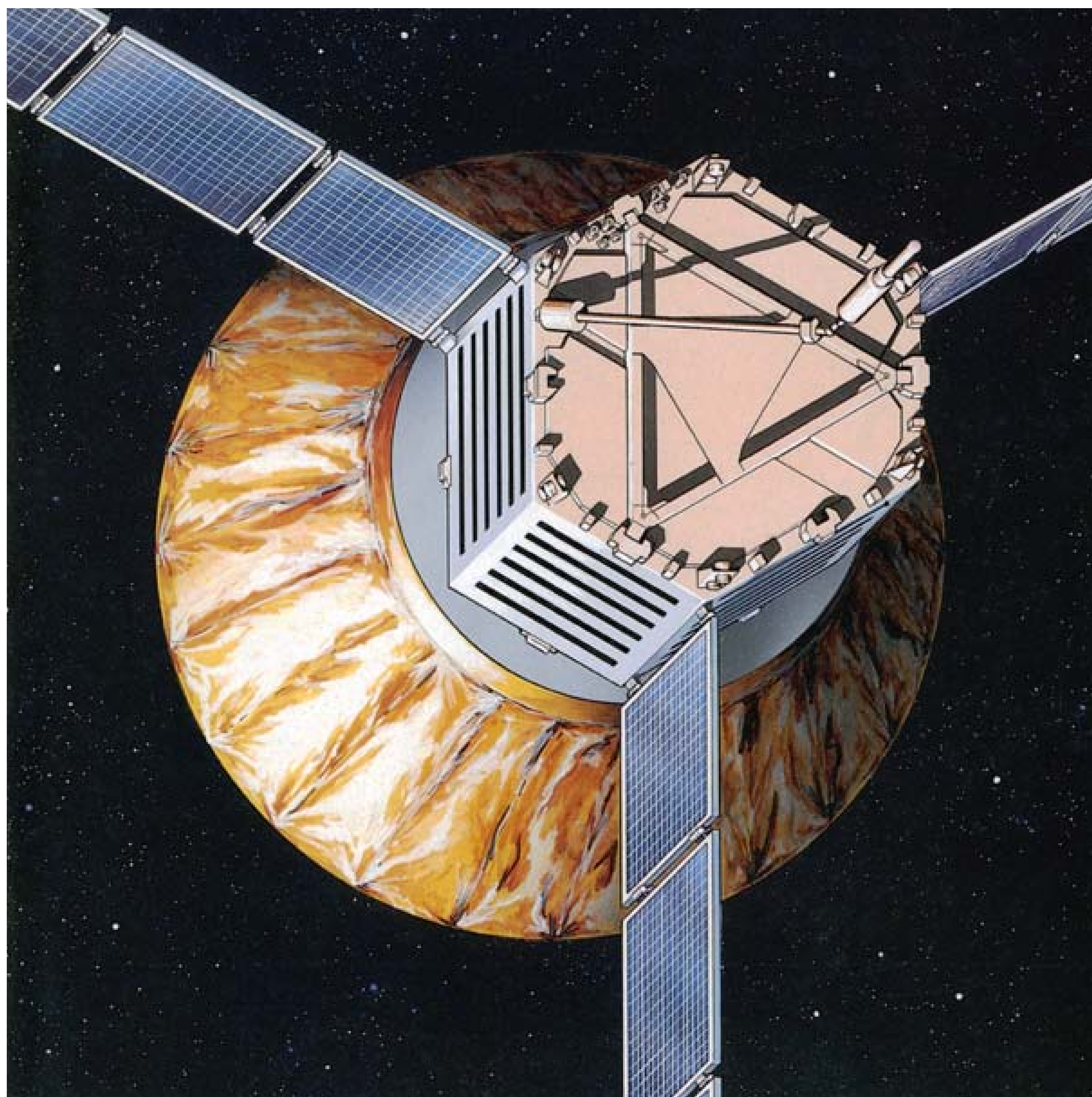
INVESTIGACION y CIENCIA

LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL A DEBATE

EL ESTRES EN LOS PRIMATES

LA FISICA DE LAS SUPERFICIES

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



EL EXPLORADOR DE LA RADIACION COSMICA DE FONDO

MARZO 1990
500 PTAS.

INVESTIGACION y CIENCIA

Marzo de 1990 Número 162

Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *¿Es la mente un programa informático?*, *¿Podría pensar una máquina?*, *La quiralidad del universo* y *Juegos de ordenador*; Santiago Torres Martínez: *ADN y ARN antisentido*; Manuel Puigcerver: *¿Qué mecanismo gobierna los ciclos glaciales?*; Ana García: *El estrés en los animales*; Ramón Pascual: *Microplasmas*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Ciencia y sociedad:

Antonio Lacasa Ruiz, Joan-Domènec Ros y Manuel Puicerver

Ciencia y empresa:

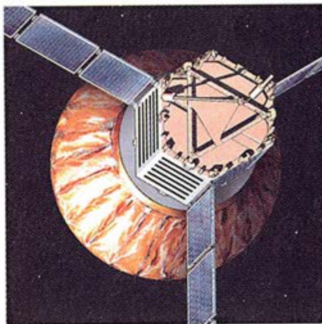
Manuel Puigcerver

Libros:

Antonio Prevosti, José Luis Comellas, Luis Alonso y José Mª Sancho

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
9-14	Michael Crawford
19	Patricia J. Wynne
20-22	Andrew Christie
27	Harold M. Weintraub, Jonathan G. Izant
28-29	Andrew Christie
30	Joseph N. M. Mol, Universidad de Vrije, Amsterdam
31	Andrew Christie
33	Ian Worpole
40-42	Ian Worpole
48	George H. Denton
50-53	George Retseck
54	Bruce Cornet, Lamont-Doherty Observatorio Geológico de la Universidad de Columbia
55-56	George Retseck
59	Enid Kotschnig
60-65	Hank Iken
69	Robert M. Sapolsky
70	Patricia J. Wynne, Gabor Kiss (*arriba*), Gabor Kiss (*abajo*)
71	Gabor Kiss
72-73	Robert M. Sapolsky
74	Gabor Kiss
77	John J. Bollinger, David J. Wineland (*izquierda*), George V. Kelvin (*derecha*)
78	George V. Kelvin
80	John J. Bollinger, David J. Wineland
81-82	George V. Kelvin
85	Joaquín Ibáñez del CENIM (*arriba y centro*), Amadeo L. Vázquez de Parga (LASUAM) (*abajo*)
86	LASUAM
87	RIBER (*arriba*), R. Miranda y Antonio Aragón Minguell (*abajo*)
88	J. Alvarez, E. G. Michel y M. C. Ascensio
89	Amadeo L. Vázquez de Parga y Carmen Ocal (*arriba*), Rodolfo Miranda y Antonio Aragón Minguell (*abajo*)
90	LASUAM
91	Julio Ferron y José M. Gallego (LASUAM), Antonio Aragón Minguell (*arriba*), Rodolfo Miranda y Antonio Aragón Minguell(*abajo*)
92	Rodolfo Miranda y Antonio Aragón Minguell
95-98	Michael Goodman
100-101	Edward Bell
102-103	Denise Saylor



El satélite "Explorador de la radiación cósmica de fondo", de la NASA, comenzó recientemente a recoger datos pertinentes a la protohistoria del universo (véase la nota extensa que se le dedica en "Ciencia y sociedad" de este mismo número). Los instrumentos del COBE barrerán el cielo durante un año para cartografiar la radiación de fondo en microondas emitida poco después de la gran explosión y la radiación infrarroja que haya sobrevivido de las primitivas estrellas.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Armand Schwab, Jr., *Managing Editor*; Timothy Appenzeller, Laurie Burnham, *Associate Editors*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; John Horgan; June Kinoshita; Philip Morrison, *Book Editor*; John Rennie; Philip E. Ros; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Paul Wallich; Karen Wright
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Georg-Dieter von Holtzbrinck
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	5500	10.000
Extranjero	6200	11.500

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 500 pesetas
Extraordinario: 650 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel.652 42 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46

Cataluña:
Prensa Científica, S.A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona
Tels. 321 81 91 - 321 83 48



ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Tecfa, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de la Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Hace...

José M.ª López Piñero

...cien años

Salvador Calderón Arana publicó *Los fosfatos de cal naturales. Ensayo de monografía minero-geológica.*

La biografía de Salvador Calderón fue en gran parte paralela a la de su hermano mayor Laureano, generalmente recordado como introductor en España de la moderna cristalografía y también como adelantado de la química fisiológica. Nacido en Madrid el año 1853, estudió la licenciatura de ciencias naturales en la Universidad Central y, pocos meses después de graduarse, ganó las oposiciones a la cátedra de historia natural del Instituto de Segunda Enseñanza, de Las Palmas (1874). Aunque ya se había iniciado en la investigación geológica, las excepcionales condiciones del archipiélago canario contribuyeron a su decisión de dedicarse a esta disciplina. De esta forma publicó una *Reseña de las rocas de la isla volcánica Gran Canaria* (1876), el mismo año de la famosa crisis universitaria del ministerio Orovio. Junto a su hermano Laureano, figuró entre los profesores que fueron separados entonces de sus cátedras y, lo mismo que éste, participó activamente en la fundación de la Institución Libre de Enseñanza. Tras impartir docencia en la misma durante una breve temporada, marchó al extranjero para perfeccionar su preparación científica. Trabajó primero en los institutos geológicos de las universidades de Ginebra, Viena y Munich y, más tarde, en los laboratorios del Collège de France, en París. Terminado este viaje de estudios, marchó en 1881 a Nicaragua, donde contribuyó a la creación del Instituto de Occidente en la ciudad de León y realizó investigaciones geológicas, cuyo principal resultado expuso en sus estudios *Los grandes lagos nicaragüenses* y *Sur le véritable prolongement des Andes dans l'Amérique centrale*, publicados el año siguiente en los *Anales de la Sociedad Española de Historia Natural* y el *Bulletin de la Société Géologique de France*, respectivamente.

A finales de 1881 regresó a España, al ser readmitido en el profesorado como titular de la cátedra de historia natural del Instituto de Segunda Enseñanza de Segovia. El nuevo ambiente político del gobierno liberal de Sagasta permitió también que en 1883 fuera comisionado por el Ministerio de Fomento para visitar los principales museos europeos de historia natural y redactar una memoria sobre el tema. Estudió los de París y otras localidades francesas, así como los de Bruselas, Estrasburgo, Berlín, Stuttgart, Munich y Viena, y publicó el informe titulado *Organización y arreglo de los museos de Historia Natural* (1884), que tuvo gran influencia en el posterior desarrollo de estas instituciones en nuestro país. En 1887 pasó a la docencia universitaria, al ganar las oposiciones a la cátedra de historia natural de la Universidad de Sevilla, donde reorganizó su museo de acuerdo con las nuevas orientaciones. Ocho años más tarde pasó a la cátedra de mineralogía de la Universidad Central, que ocupó hasta su muerte en 1911.

La obra científica de Salvador Calderón estuvo fundamentalmente dedicada al estudio de los minerales y rocas españoles, utilizando las técnicas micrográficas que había introducido José Macpherson, otro geólogo del círculo de la Institución Libre de Enseñanza, en cuyo laboratorio privado de Madrid trabajó con frecuencia. A esta línea corresponden numerosas investigaciones que aparecieron en el *Boletín del Mapa Geológico*, los *Anales de la Sociedad Española de Historia Natural* y diversas revistas francesas, centroeuropeas y británicas. Otros aspectos de su labor se refieren a la dinámica terrestre, tema en el que destaca su ensayo orogénico sobre la meseta central de la Península ibérica, y a la paleontología. En esta última disciplina, sus principales contribuciones fueron el libro *Enumeración de los vertebrados fósiles en España* (1877) y sus descripciones de los foraminíferos de Andalucía.

Ofrecemos a continuación el texto introductorio de la monografía sobre *Los fosfatos de cal naturales*:

"El apatito y los demás fosfatos de cal naturales constituyen un asunto de estudio, bajo el punto de vista de su origen, transformaciones y relaciones con los restantes factores de la vida del globo, que ofrece un interés especial para mostrar en un segundo ensayo la dirección que debería seguir esa rama que hemos propuesto llamar la *Mineralogía geológica*. A ésta correspondería encauzar las investigaciones genéticas y de química terrestre, según un plan científico de que se carece aún.

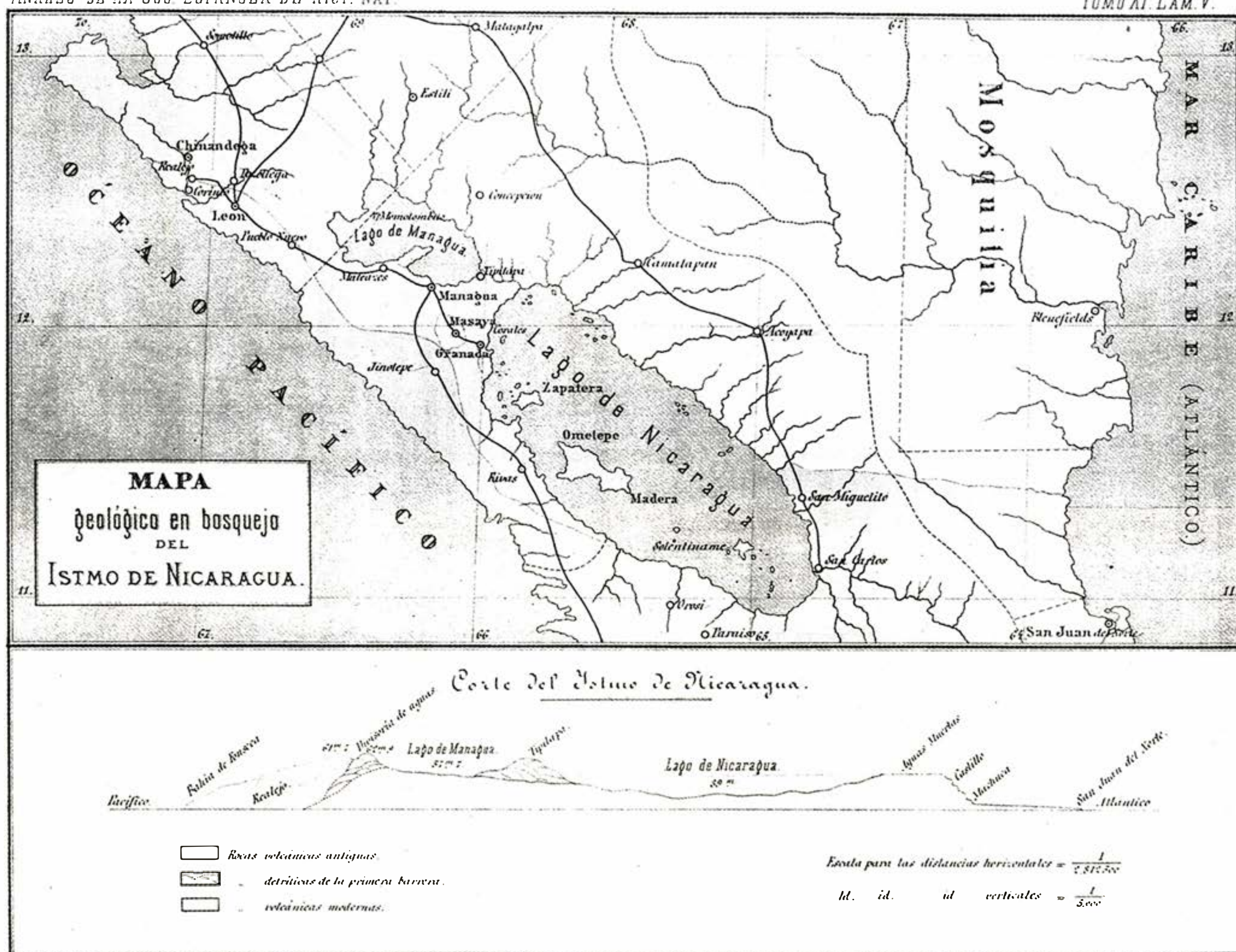
"El estudio de los fosfatos naturales muestra bien claramente cómo, a pesar de producirse un material considerable de datos sobre la historia de una especie mineral, no se llega a constituir un cuerpo de doctrina, por falta de un plan científico que presida a los naturalistas en este linaje de investigaciones. Los agricultores, en sus ensayos y luminosas polémicas sobre el verdadero valor de los fosfatos como abonos y mejoramientos de las tierras; los industriales, en sus trabajos para obtener dichas sustancias a bajo precio y para fabricar con ellas los superfosfatos; los geólogos, esclareciendo la edad y formación de los depósitos, y los químicos, ocupados en perseguir las transformaciones del fosfato, tanto en el seno de las tierras arables y de los organismos como en sus laboratorios, y de reproducir en ellos los procesos genéticos naturales, todos, y cada cual desde su especial punto de vista y en esferas desgraciadamente independientes, han realizado infinidad de trabajos y producido valiosísimas investigaciones que es difícil recopilar, y más aún enlazar sistemáticamente. Y, sin embargo, al intentar nosotros esta obra, sin pretender lograrlo de un modo cumplido, hemos podido comprobar una vez más que siempre que en el campo de la ciencia de los materiales constitutivos del globo se reúne el cuestionario de los puntos tanteados sobre un asunto cualquiera, se observa la deficiencia de muchos términos, aun de los más necesarios para penetrar en la índole verdadera de los problemas que entraña su papel como parte integrante del organismo terrestre.

"Cierto que en el caso que motiva el presente ensayo puede afirmarse ya con seguridad que la fuente primera y universal de los fosfatos naturales es el apatito, que en forma de cristales microscópicos se halla disperso en el seno de las rocas antiguas, tanto graníticas y eruptivas como sedimentarias metamorfizadas; pero ¿qué sabemos aún respecto al origen de este apatito, ni de su paso a otras rocas sedimentarias, en las que se halla tan pronto cristalino como amorfo, de su influencia en la producción de otros fosfatos y otros minerales, que, a no dudarlo, deben su existencia a las ac-

ciones y reacciones de los elementos del apatito primitivo con diversos factores integrantes de la corteza terrestre?

"Otra cuestión muy oscura y desatendida, a pesar de su manifiesta transcendencia, es la tocante a la parquedad que la naturaleza muestra en punto a creación de minerales fosfatados. El químico, disponiendo de un material y de elementos insignificantes en comparación de los que pone en juego el gran laboratorio terrestre, ha logrado producir un gran número de compuestos de este grupo que no existen en el globo, y otros que sólo se presentan en circunstancias muy excepcionales. Los principales fosfatos que se conocen en estado natural son los de cal, magnesia y hierro; estos dos últimos relativamente escasos; y mucho más todavía lo son otras combinaciones múltiples, que forman fosfatos dobles y triples, en que interviene la alúmina, por ejemplo, el mineral que con el nombre de *goyacita* ha descrito M. Damour, y que se compone de ácido fosfórico, alúmina y cal, y se halla en pequeños granos redondeados en los terrenos diamantíferos de la provincia de Ouro Preto, en el Brasil. Asimismo se citan como excepcionales los fosfatos de cal hidratados, como la *fairfielddita* y la *isoclasa* del gusano, y la *sombrerita*, mezcla de fosfato de cal hidratado con otros fosfatos de la isla del Sombrero. Es, en fin, notable que en el estado natural no existan ni el fosfato ácido de cal o superfosfato, el bicálcico o precipitado que crea la industria de los abonos, ni el tetracálcico, que los ingleses Gilchrist y Thomas han logrado producir en condiciones económicas utilizando el ácido fosfórico de las escorias y bajo la influencia de una alta temperatura. Asimismo los sílico-fosfatos, con la sola excepción de unos granillos de la creta de Ciply, de que haremos mérito especial, y que acaban de descubrirse, todos los demás son productos artificiales, pues algunos minerales reputados como tales (*hipoclorita, sordawalita*, etc.), parecen ser simples mezclas de silicatos y fosfatos. En cambio en el laboratorio de M. M. Hautefeuille y Margottet han obtenido un verdadero *fosfato de sílice*, como ellos le han llamado, y cristalizado hermosamente bajo cuatro formas distintas, que responde a la fórmula $Ph\ O_5$, $Si\ O_2$, cuerpo resultante de someter a la acción del calor una disolución de sílice en el ácido fosfórico. Deshidratando la disolución a una temperatura elevada se producen además concreciones de fosfato de sílice hidratado.

"Los fosfatos naturales se pueden dividir en dos series de muy distinto desarrollo en el globo: *apatitos*, en cuya base domina la cal, y *wagneritas*, en que la cal es remplazada por la magnesia. Los primeros son hexagonales, al paso que son monoclínicos los segundos. Las reproducciones



Una de las láminas que ilustran el estudio de Salvador Calderón, Los grandes lagos nicaragüenses *(1882), principal resultado de sus investigaciones geológicas durante su estancia en América Central el año anterior.*

artificiales han puesto de manifiesto una serie de wagneritas paralela a la de los apatitos, serie que no tiene equivalente en los compuestos naturales.

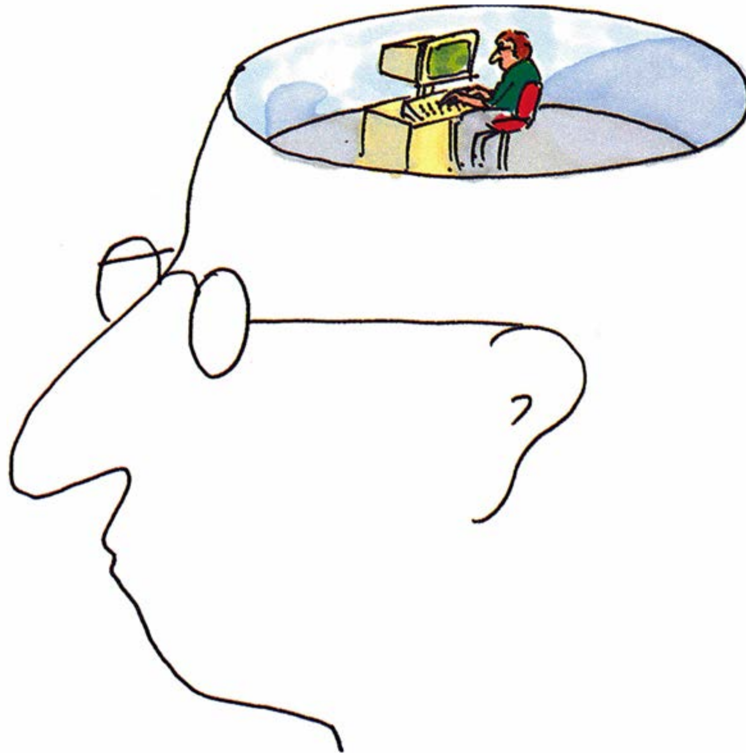
”La causa de semejante sobriedad en la producción de especies fosfatadas, y el predominio tan preponderante que, en medio de condiciones diversas por extremo, ofrece el fosfato anhidro sobre los demás fosfatos de cal, es cuestión, como queda dicho, de alto interés, pues parece constituir una nota característica de la economía del globo terrestre.

”Otro orden de consideraciones independiente a primera vista de las anteriores, y que no obstante resulta en realidad inseparable de ellas, se refiere a la relación que el fosfato de cal ofrece con los organismos. Todos los vegetales y todos los animales lo contienen, siquiera sea en pequeña cantidad; pero con tal constancia, que constituye un factor indispensable para su desarrollo. Al mismo tiempo, ellos se encargan de hacerle emigrar de un punto a otro en una rotación eterna y vertiginosa, cual la de muy pocas sustancias minerales; y a ellos se debe la inmensa mayoría del fosfato interpuesto en los sedimentos, merced al apatito de las antiguas rocas. Así, este último, que se reputa como un cuerpo casi del todo inatacable por los agentes físico-químicos, entra en el torrente de la circulación del globo, merced a la acción combinada de estos agentes y de los organismos, en esa solidaridad de los mundos mineral y orgánico.

”Esta complejidad de relaciones del fosfato de cal lleva consigo su pluralidad de yacimientos que tanto le caracteriza, pues integra en la constitución de toda clase de rocas, desde las graníticas y cristalofílicas, hasta las metamórficas, volcánicas y sedimentarias de todas las épocas, siendo la mejor prueba de la difusión universal del ácido fosfórico la existencia de la vida orgánica en todos los parajes. De aquí tantas teorías sobre el origen de los fosfatos, teorías que todas tienen verdad en lo que afirman y error en lo que niegan, al pretender carácter absoluto.

”El cuadro sistemático de estas cuestiones y de otras subordinadas a ellas, bajo el punto de vista puramente especulativo, abarcándolas bajo sus múltiples aspectos y relaciones entre sí, presenta, a no dudarlo, un campo de estudio de excepcional interés para el esclarecimiento de esa fisiología íntima del globo, que empieza apenas a bosquejarse, y que es al conocimiento de la vida de la tierra lo que la fisiología histológica al estudio de los organismos”.

Un debate sobre inteligencia artificial



A lo largo de los últimos 35 años, los esfuerzos por producir máquinas pensantes han cosechado una curiosa mezcla de éxitos y fracasos. Los ordenadores han llegado a adquirir maestría en tareas tan intelectuales como el ajedrez y el cálculo integral, pero todavía están por alcanzar los talentos de una langosta para habérselas con el mundo real. Personas ajenas al campo de la inteligencia artificial han argumentado que tal ambición está condenada al fracaso; los ordenadores son, por naturaleza, incapaces de auténtica cognición. En las páginas siguientes, John R. Searle, de la Universidad de California en Berkeley, sostiene que los programas informáticos jamás podrán dar origen a mentes. En el bando contrario, Paul M. Churchland y Patricia Smith Churchland, de la Universidad de California en San Diego, afirman que los circuitos construidos tomando al cerebro por modelo podrían muy bien llegar a poseer inteligencia. Tras este debate subyace la cuestión de la naturaleza del pensamiento. ¿En qué consiste pensar? Esta cuestión ha intrigado a los humanos (únicos entes de los que se sabe que lo hacen) desde hace milenios. Los ordenadores, que hasta el momento no piensan, han dado a la pregunta una nueva orientación y han echado por tierra muchas aproximaciones. La respuesta definitiva sigue en el alero.

¿Es la mente un programa informático?

No. Los programas se limitan a manipular símbolos; la mente humana, en cambio, les atribuye significado

John R. Searle

¿Puede pensar una máquina? ¿Puede una máquina tener pensamientos conscientes, en el mismo y preciso sentido en que los tenemos usted y yo? Si entendemos por "máquina" un sistema material capaz de desempeñar ciertas funciones (¿y qué otra cosa podría, si no, significar?), resulta que los humanos somos máquinas de una clase biológica especial y, como los humanos piensan, es evidentemente cierto que hay máquinas capaces de pensar. Y quién sabe si será posible producir máquinas pensantes que se valgan de materiales totalmente distintos, máquinas que utilicen —es un decir— microcircuitos de silicio o válvulas termoiónicas. Tal vez se demuestre que ello es imposible, pero ciertamente eso es, hoy por hoy, cosa que no sabemos.

Sin embargo, en los últimos decenios, la cuestión de si las máquinas podrían pensar ha recibido una interpretación enteramente distinta. La cuestión planteada en su lugar es: ¿podría una máquina pensar justamente en virtud de que ejecuta un programa informático? ¿Es el programa, en sí mismo, constitutivo de pensamiento? Se trata de una cuestión completamente diferente, porque no se ocupa de las propiedades físicas, causales, de sistemas materiales actuales o potenciales, sino que atañe, por el contrario, a las propiedades abstractas, computacionales, de programas informáticos formales que podrían realizarse en cualquier clase de sustancia, sin otra condición que la de que ésta sea capaz de ejecutar el programa.

No son pocos los investigadores en inteligencia artificial (IA) convencidos de que esta segunda pregunta tiene respuesta afirmativa; esto es, creen que al diseñar los programas adecuados, y dotándolos de los oportunos ingresos y salidas, están literalmente creando mentes. Creen, además, disponer de un criterio científico para determinar si han triunfado o fracasado en tal empresa, a saber, el test de Turing, ideado por Alan M. Turing, padre fundador de la inteligencia artificial. El test de Turing, en la forma en que actualmente se comprende, consiste sencillamente en esto: si un ordenador puede actuar de modo tal que un experto sea incapaz de distinguir la actuación del ordenador de la de un humano provisto de cierta facultad cognitiva —la capacidad de sumar o de comprender el idioma chino, pongamos por caso—, entonces el ordenador posee también esa facultad. El objetivo consiste, pues, en diseñar programas que simulen de tal forma la cognición humana que logren superar la prueba de Turing. Más aún, tal programa no sería un mero modelo de la mente; sería una mente en sentido literal, en el mismo sentido en que una mente humana lo es.

No es en modo alguno cierto que todos los investigadores en inteligencia artificial acepten tan extremada opinión. Un punto de vista más cauteloso considera que los modelos informáticos resultan útiles para estudiar la mente, de igual manera que lo son para el estudio de la meteorología, la economía o los mecanismos de la biología molecular. Para distinguir ambos puntos de vista, calificaré al primero de inteligencia artificial en sentido fuerte (IA fuerte) y, al segundo, de inteligencia artificial en sentido débil (IA débil). Es importante ver hasta qué punto resulta osada la concepción fuerte. La IA fuerte proclama que el pensamiento consiste en la mera manipulación de símbolos formales, y eso es exactamente lo que hace el ordenador: manipular símbolos formales. Una tesis que acostumbra resumirse afirmando que "la mente es al cerebro como el programa al ordenador".

La IA fuerte es una tesis insólita en las teorías de la mente, en dos aspectos cuando menos: puede ser formulada claramente y admite una refutación sencilla y decisiva. La refutación es tal que cualquier persona puede juzgarla por sí misma. Reza como sigue. Tomemos un idioma que no comprendemos; en mi caso, tal idioma puede ser el chino. Por lo que a mí se refiere, un escrito en chino me parece una serie de garabatos ininteligibles. Supongamos ahora que me instalan en una habitación que contiene cestas repletas de símbolos chinos. Supongamos también que me proporcionan un libro de instrucciones en español, con reglas que estipulan cómo han de emparejarse unos símbolos chinos con otros. Las reglas permiten reconocer los símbolos puramente por su forma y no requieren que yo comprenda ninguno de ellos. Las reglas podrían estipular cosas como: "Tome un signo gargarabato de la cesta número uno y colóquelo al lado de un signo gargarabís tomado de la cesta número dos".

Imaginemos que personas situadas fuera de la habitación y que sí comprenden el chino me van entregando pequeños grupos de símbolos, y que, en respuesta, yo manipulo los símbolos de acuerdo con las reglas del libro y les entrego pequeños grupos de símbolos. Ahora, el libro de instrucciones es el "programa informático";

JOHN R. SEARLE es profesor de filosofía en la Universidad de California en Berkeley. Recibió el doctorado por la Universidad de Oxford, donde fue becario Rhodes. Searle desea agradecer a Stuart Dreyfus, Stevan Harnad, Elizabeth Lloyd e Irvin Rock sus comentarios y sugerencias.

las personas que lo escribieron son los "programadores" y yo soy el "ordenador". Los cestos llenos de símbolos constituyen la "base de datos", los pequeños grupos que me son entregados son "preguntas" y los grupos que yo entrego, las "respuestas".

Supongamos ahora que el libro de instrucciones esté escrito de modo tal que mis "respuestas" a las "preguntas" resulten indistinguibles de las de un chino nativo. Por ejemplo, la gente del exterior podría entregarme ciertos símbolos, desconocidos por mí, que significan: "¿Cuál es su color favorito?", y que tras consultar las instrucciones del libro yo devuelvo símbolos, también desconocidos por mí, que significan: "Mi favorito es el azul, pero también me gusta mucho el verde". Estoy superando el test de Turing en lo que a comprender el chino concierne. Y, al mismo tiempo, ignoro totalmente el chino. Y en el sistema que estoy describiendo no hay forma de que yo llegue a comprender el chino, pues no hay forma de que yo pueda aprender los significados de ninguno de los símbolos. Estoy manipulando símbolos, lo mismo que un ordenador, pero sin adscribir significado a los símbolos.

El propósito de este experimento mental es el siguiente: si yo no comprendo el chino basándome solamente en el funcionamiento de un programa informático para comprender el chino, tampoco lo comprende entonces, con ese mismo fundamento, ningún otro ordenador digital. Los ordenadores digitales se limitan a manipular símbolos de acuerdo con las reglas del programa.

Lo dicho para el chino vale igual para otras formas de cognición. La mera manipulación de símbolos no basta, por sí misma, para garantizar cognición, percepción, comprensión, pensamiento, y así sucesivamente. Y dado que los ordenadores, en su cualidad de tales, son dispositivos de manipulación de símbolos, la mera ejecución del programa no basta para garantizar la cognición.

Este sencillo argumento es decisivo contra las pretensiones de la inteligencia artificial fuerte. La primera premisa del argumento enuncia, sencillamente, el carácter formal de un programa informático. Los programas se definen en términos de manipulación de símbolos; los símbolos son puramente formales o, como también se dice, "sintácticos". Incidentalmente, nótese que es el carácter formal de los programas lo que confiere a los ordenadores su gran potencia. El mismo programa puede funcionar en multitud de equipos; por otra parte, un mismo equipo puede hacer funcionar una infinidad de distintos programas. Puede considerarse este "axioma" como sigue:

Axioma 1. *Los programas informáticos son formales (sintácticos).*

Tan crucial es este punto que vale la pena explicarlo con mayor detalle. Para procesar información, un ordenador digital empieza por codificarla en el simbolismo utilizado por el ordenador; a continuación, manipula los símbolos mediante un conjunto de reglas enunciadas precisa e inequívocamente. Dichas reglas constituyen el programa. Por ejemplo, en la primitiva teoría de Turing, los símbolos eran sencillamente ceros y unos, y las reglas del programa establecían cosas como: "Imprime un 0 en la cinta, desplázate un cuadro hacia la izquierda y borra un 1". Lo verdaderamente pasmoso de los ordenadores es que cualquier información enunciable en un lenguaje admita su formulación en tal sistema, y que cualquier tarea de procesamiento de información que sea resoluble mediante reglas explícitas pueda programarse.

Hay otros dos puntos importantes más. Primero, los símbolos y los programas son nociones puramente abstractas: no tienen propiedades físicas esenciales que los definan, y pueden plasmarse en un medio material cualquiera. Los ceros y los unos, en cuanto símbolos, carecen de propiedades físicas esenciales, y carecen "a fortiori" de propiedades físicas, causales. Hago hincapié en este punto porque resulta tentador identificar los ordenadores con una tecnología específica —los microcircuitos de silicio, pongamos por caso— y pensar que las cuestiones objeto de debate conciernen a la física de tales microcircuitos, o pensar que la sintaxis identifica cierto fenómeno físico que pudiera poseer potencias causales aún desconocidas, a la manera en que los fenómenos físicos reales, como la radiación electromagnética o los átomos de hidrógeno, poseen propiedades físicas, causales. El segundo punto estriba en que los símbolos se manipulan sin aludir ni referirse a significado alguno. Los símbolos del programa pueden denotar lo que el programador desee, sea lo que fuere. En este sentido, el programa tiene sintaxis, pero no semántica.

El siguiente axioma es un mero recordatorio del hecho palmario de que los pensamientos, percepciones, comprensiones y demás tienen un contenido mental. En virtud de su contenido, pueden tratar de objetos y estados de cosas del mundo. Si el contenido comporta lenguaje, habrá sintaxis además de semántica, pero la comprensión lingüística exige, al menos, un marco semántico. Si, por ejemplo, estoy pensando en la última elección presidencial, cruzarán por mi mente ciertas palabras, pero esas palabras se refieren a la elección solamente porque yo atribuyo a estas palabras significados específicos, de acuerdo con mis conocimientos de español. Tales palabras son, a este respecto, muy distintos de los símbolos chinos. Séame permitido abreviar este axioma como:



1. Satisfago el test de Turing correspondiente a la comprensión del idioma chino.

Axioma 2. *La mente humana posee contenidos mentales (semánticos).*

Permítaseme ahora añadir la tesis que demostró la sala china. Tener a nuestra disposición los símbolos propiamente dichos —la mera disponibilidad de la sintaxis— no basta para disponer de la semántica. La mera manipulación de símbolos no es suficiente para garantizar el conocimiento de sus significados. Resumiré lo dicho como sigue:

Axioma 3. *La sintaxis, por sí misma, no es constitutiva ni suficiente para la semántica.*

A cierto nivel, este principio es verdadero por definición. Como es obvio, podríamos definir diferentemente los términos sintaxis y semántica. Lo importante es que existe una distinción entre los elementos formales, que carecen de significado o contenido intrínseco, y aquellos fenómenos que sí poseen contenido intrínseco. De estas premisas se sigue que:

Conclusión 1. *Los programas ni son constitutivos de mentes, ni suficientes para ellas.*

Lo que no es sino otra forma de decir que la IA fuerte es falsa.

Importa esclarecer qué es exactamente lo que se demuestra y lo que no se demuestra con este argumento.

Primero, no he tratado de demostrar que "los ordenadores no pueden pensar". Dado que todo cuanto pueda simularse computacionalmente admite ser descrito como un ordenador, y dado que nuestros cerebros pueden, a ciertos niveles, ser simulados, se deduce trivialmente que nuestros cerebros son ordenadores; y son ciertamente capaces de pensar. Pero del hecho de que un sistema pueda simularse mediante manipulación de símbolos y del hecho de que esté pensando, no se deduce que el pensamiento sea equivalente a la manipulación formal de símbolos.

En segundo lugar, no he tratado de demostrar que tan sólo sean capaces de pensar los sistemas de base biológica, como nuestro cerebro. En este momento, éstos son los únicos sistemas que sabemos de cierto que son capaces de pensar, pero podríamos descubrir, en el universo, otros sistemas capaces de producir pensamientos conscientes; podríamos, incluso, llegar a ser capaces de crear artificialmente sistemas pensantes. Considero que este asunto es cuestión abierta.

Tercero, la tesis IA fuerte no consiste en que los ordenadores, provistos de los programas adecuados, pudieran estar pensando, que pudieran tener algunas propiedades psicológicas por ahora no detectadas; es, por el contrario, que los ordenadores tienen que estar pensando, porque en el pensar no hay más.

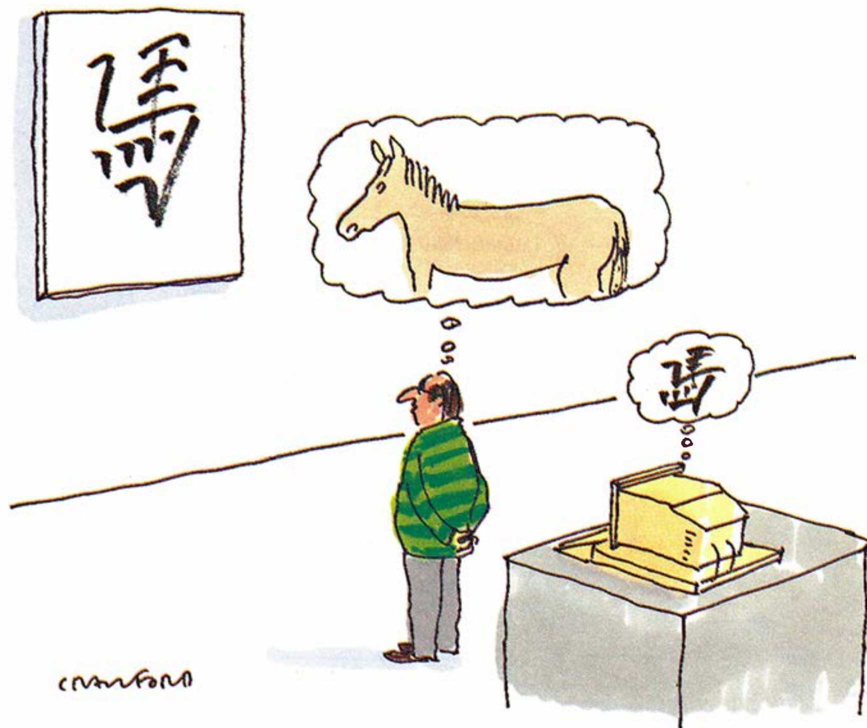
Cuarto, he tratado de refutar la inteligencia artificial fuerte así definida. He procurado demostrar que el programa, en sí mismo, no es constitutivo de pensamiento, porque el programa es mero asunto de manipulación formal de símbolos, y sabemos ya, por fuente independiente, que las manipulaciones de símbolos no bastan por sí mismas para garantizar la presencia de significados. Ese es el principio sobre el cual funciona el argumento de la sala china.

Hago precisamente aquí hincapié en estos puntos debido, en parte, a que me da la impresión de que los Churchland, en su artículo conjunto [véase "¿Podría pensar una máquina?, por Paul M. Churchland y Patricia S. Churchland, en este mismo número], no han entendido del todo los problemas. Parecen pensar que la IA fuerte proclama que pudiera acabar resultando que los ordenadores pensasen y que yo estoy negando tal posibilidad fundándome en argumentos de sentido común. Pero no es eso lo que la IA proclama, y mi argumentación en contra nada tiene que ver con el sentido común.

Tendré cosas que añadir sobre sus objeciones un poco más adelante. Entretanto, quisiera señalar que, contrariamente a lo que los Churchland sugieren, el argumento de la sala china refuta igualmente toda pretensión de IA fuerte para las nuevas tecnologías en paralelo, inspiradas y basadas en las redes neuronales. A diferencia del ordenador tradicional, de organización von Neumann, que efectúa la computación paso a paso, estos otros sistemas poseen muchos elementos computacionales que operan en paralelo e interactúan según reglas inspiradas en la neurobiología. A pesar de la modestia de los resultados actuales, estos modelos de "procesamiento distribuido y paralelo", o modelos "conexionistas", suscitan cuestiones útiles relativas a cómo podrían funcionar verdaderamente los sistemas paralelos de redes complejas, como los cerebros de los seres vivos, para la producción de conducta inteligente.

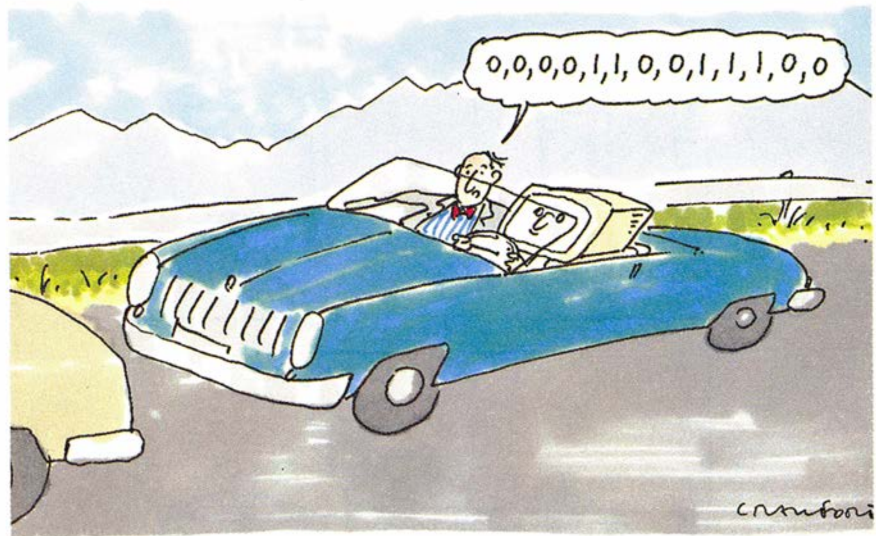
Sin embargo, este carácter paralelo, "cerebriforme", del procesamiento es irrelevante, por lo que a los aspectos puramente computacionales del proceso se refiere. Cualquier función computable en una máquina paralela puede también computarse en una máquina serial. De hecho, dado que las máquinas paralelas son raras todavía, es frecuente hacer funcionar los programas conexionistas en máquinas seriales, tradicionales. El procesamiento en paralelo no proporciona, pues, una forma de eludir el argumento de la sala china.

Más todavía, el sistema conexionis-



2. Los programas de ordenador son formales (sintácticos). Las mentes humanas poseen contenidos mentales (semánticos).

ta está sujeto, incluso en sus propios términos, a una variante de la objeción presentada por el primitivo argumento de la sala china. Imaginemos que, en vez de una sala china, tengo un gimnasio chino: una gran estancia que contiene muchas personas monóglotas, que sólo hablan español. Estas personas se encargarían de efectuar las mismas funciones que los nodos y las sinapsis de una arquitectura conexionista, cual la describen los Churchland, y el resultado sería el mismo que si se tuviera a una sola manipulando símbolos de acuerdo con un libro de instrucciones. Nadie, en el gimnasio, habla una palabra de chino, y no hay modo de que el sistema, como un todo, aprenda el significado de ninguna palabra china. Empero, con los ajustes apropiados, el sistema puede proporcionar respuestas correctas a las preguntas chinas.



3. ¿Qué semántica está entregando ahora el sistema?

Como ya sugerí anteriormente, las redes conexionistas poseen interesantes propiedades que las capacitan para simular procesos cerebrales con mayor precisión que la arquitectura tradicional serial. Pero las ventajas de la arquitectura en paralelo para la IA débil son completamente irrelevantes respecto a las objeciones que el argumento de la sala china presenta a la inteligencia artificial en sentido fuerte.

Los Churchland se equivocan por completo en este punto cuando afirman que un gimnasio chino suficientemente grande podría tener características mentales de nivel superior, emanadas del tamaño y complejidad del sistema, exactamente lo mismo que el cerebro entero posee características mentales no poseídas por ninguna de las neuronas individuales. Se trata, sin duda, de una posibilidad, pero que nada tiene que ver con la computación. Computacionalmente, los sistemas en serie y en paralelo son equivalentes: toda computación que se pueda efectuar en paralelo puede realizarse en serie. Si la persona que ocupa la sala china es computacionalmente equivalente a unos y otros, y si esta persona no comprende el chino por mera ejecución de los cómputos, tampoco aquéllos. Los Churchland tienen razón al afirmar que el argumento de la sala china fue ideado con la mirada puesta en la inteligencia artificial tradicional, pero se equivocan al pensar que el conexionismo es inmune al argumento: el razonamiento es aplicable a cualquier sistema computacional. No es posible lograr un contenido mental cargado de semántica a partir sólo de cómputos formales, sean éstos ejecutados en serie o en paralelo; por tal motivo, el argumento de la sala china refuta la inteligencia artificial fuerte en cualquiera de sus formas.

Muchos individuos a quienes este argumento deja impresionados sienten perplejidad, no obstante, en lo atinente a las diferencias entre personas y ordenadores. Si los humanos son ordenadores, al menos en un sentido trivial, y si los humanos poseen semántica, ¿por qué no podríamos, pues, dar semántica a otros ordenadores? ¿Por qué no habríamos de poder programar un Vax o un Cray para que tuviera, como nosotros, pensamientos y sentimientos? ¿Por qué no podría una nueva tecnología informática tender un puente sobre el golfo que separa la forma del contenido, la sintaxis de la semántica? ¿En qué estriban, realmente, las diferencias entre los cerebros animales y los sistemas informáticos, que permiten que el argumento de la sala china sea válido contra los ordenadores, pero no contra los cerebros?

La diferencia más obvia está en que los procesos que definen a un objeto como ordenador –a saber, los procesos computacionales– son completamente independientes de cualquier referencia a un tipo específico de ejecución en equipo tangible. En teoría, podríamos construir un ordenador valiéndonos de latas vacías de cerveza, sujetas unas a otras con alambres y movidas por molinos de viento.

Pero, cuando se trata de cerebros, y a pesar de que la ciencia ignora en gran medida de qué modo funcionan y producen estados mentales, queda uno sorprendido por la extrema especificidad de su anatomía y fisiología. En los casos donde se dispone de cierta comprensión de cómo los procesos cerebrales producen fenómenos mentales —por ejemplo, dolor, sed, visión, olor— resulta claro que intervienen procesos neurobiológicos específicos. La sed, al menos la de cierta clase, está provocada por la excitación de cierto tipo de neuronas del hipotálamo, excitación provocada, a su vez, por la acción de un péptido específico, la angiotensina II. El proceso causal va "de abajo arriba", en el sentido de que procesos de nivel neuronal bajo provocan fenómenos mentales de nivel más alto. De hecho, y hasta donde se nos alcanza, cada acontecimiento "mental", desde la sensación de sed hasta los pensamientos en teoremas matemáticos o los recuerdos de la infancia, está provocado por la activación de neuronas específicas ubicadas en arquitecturas neuronales específicas.

¿Por qué habría de ser importante esta especificidad? Después de todo, la excitación de las neuronas podría simularse en ordenadores cuyos procesos físicos y químicos fueran completamente distintos de los del cerebro. La respuesta es que el cerebro no se limita a dar un ejemplo concreto de una pauta formal o de un programa (aunque también haga eso), sino que *causa* estados mentales en virtud de procesos neurobiológicos específicos. Los cerebros son órganos biológicos específicos, y sus específicas propiedades bioquímicas les permiten provocar la consciencia y otros fenómenos mentales. Las simulaciones computarizadas de procesos mentales proporcionan modelos de los aspectos formales de estos procesos. Ahora bien, simulación y duplicación no deben confundirse. El modelo compu-



4. ¿Cómo se ha podido suponer que una simulación informática de un proceso mental tiene que ser el proceso real?

tacional de los procesos mentales no es más real que el modelo computacional de cualquier otro fenómeno natural.

Podríamos imaginar una simulación computarizada de la acción de péptidos en el hipotálamo, precisa y exacta hasta la última sinapsis. Pero igualmente podríamos imaginar una simulación de la oxidación de los hidrocarburos en el motor de un automóvil o de la acción de los procesos digestivos en un estómago que está digiriendo pizza. Y la simulación no es cosa más real en el caso del cerebro que lo es en el del motor o del estómago. Descartados los milagros, no podríamos hacer funcionar nuestro automóvil efectuando una simulación informática de la combustión de la gasolina, y no se digiere la pizza ejecutando el programa que simula tal digestión. Parece evidente que tampoco la simulación de la cognición podrá producir los efectos de la neurobiología de la cognición.

Todos los fenómenos mentales están causados, en consecuencia, por procesos neurofisiológicos en el cerebro. Así, pues:

Axioma 4. *Los cerebros causan mentes.*

En conjunción con mi deducción anterior, infiero, trivialmente:

Conclusión 2. *Cualquier otro sistema capaz de causar mentes habría de poseer poderes causales equivalentes (cuando menos) a los de los cerebros.*

Es como decir que, si un motor eléctrico puede hacer rodar un coche tan rápidamente como un motor de gasolina, ha de entregar a las ruedas una potencia equivalente (cuando menos). Esta conclusión nada afirma sobre los mecanismos. De hecho, la cognición es un fenómeno biológico; los estados y procesos mentales son causados por procesos cerebrales. Lo cual no implica que solamente los sistemas biológicos sean capaces de pensar, pero sí implica que todo sistema alternativo, sea de silicio, latas de cerveza o lo que fuere, habría de tener las facultades causales relevantes y equivalentes a las de los cerebros. Puedo deducir ahora:

Conclusión 3. *Cualquier artefacto que produjera fenómenos mentales, cualquier cerebro artificial, habría de ser capaz de duplicar las potencias causales específicas de los cerebros, cosa que no podría hacer limitándose a hacer funcionar un programa formal.*

Puedo, además, deducir una importante conclusión para los cerebros humanos:

Conclusión 4. *La forma en que los cerebros humanos producen, en realidad, fenómenos mentales no puede deberse exclusivamente a la ejecución de un programa informático.*

Presenté por vez primera la parábola de la sala china en las páginas de *Behavioral and Brain Sciences*, en 1980, donde apareció, como es costumbre en esa revista, acompañada de comentarios de mis iguales, 26 comentarios en este caso. Francamente, me parece que la tesis que sostiene es bastante obvia, pero, para sorpresa mía, la publicación fue seguida de una segunda riada de objeciones, que —para mayor sorpresa— continúa hasta el presente. No cabe duda de que la sala china tocó un nervio sensible.

La tesis de la IA fuerte es que cualquier sistema —tanto si está construido con latas de cerveza, micropastillas de silicio o papel higiénico— no solamente podría tener pensamientos y sentimientos, sino que los *ha de tener*, sin más condición que la de ser capaz de ejecutar el programa debido, con los obligados ingresos y salidas. Ahora bien, es ésta una concepción profundamente antibiológica, y se podría pensar que quienes trabajan en inteligencia artificial estarían de buena gana dispuestos a abandonar tal posición. Muchos de ellos, especialmente los más jóvenes, están de acuerdo conmigo. Pero lo que me sorprende es el número y vehemencia de los defensores de la IA fuerte. He aquí algunas de las objeciones más comunes.

a. La verdad es que, en la sala china, usted sí entiende el chino, aunque no se da cuenta. Después de todo, es posible entender algo sin saber que uno lo entiende.

b. Usted no comprende el chino,

pero existe en usted un subsistema (inconsciente) que sí lo comprende. Después de todo, es posible tener estados mentales inconscientes, y no hay razón por la que su comprensión del chino no pueda ser totalmente inconsciente.

c. Usted no comprende el chino, pero la sala entera sí. Usted desempeña en este caso la misma función que una de las neuronas del cerebro y, al igual que una neurona individual no puede comprender por sí sola, pero contribuye a que el sistema completo comprenda, así usted no comprende, pero el sistema completo sí.

d. La semántica no existe en modo alguno; tan sólo existe sintaxis. Suponer que en el cerebro existen misteriosos "contenidos mentales", "procesos de pensamiento" o "semántica" no pasa de ser una ilusión precientífica. Todo cuanto existe en el cerebro es una manipulación sintáctica de símbolos del mismo tipo que la que tiene lugar en los ordenadores. Nada más.

e. Usted no está, en realidad, haciendo funcionar un programa informático; tan sólo cree que lo hace. En cuanto un agente consciente procede a ejecutar los pasos de un programa, deja por completo de tratarse de la puesta en práctica de un programa.

f. Los ordenadores tendrían semántica y no mera sintaxis si sus entradas y salidas fueran puestas en la apropiada relación causal con el resto del mundo. Supongamos que el ordenador se instale en un robot, que se montan en la cabeza del robot cámaras de televisión y transductores que lleven los mensajes de televisión al ordenador, y que hacemos que las señales de salida del ordenador gobiernen los brazos y piernas del robot. El sistema completo tendría entonces una semántica.

g. Si el programa simulase el funcionamiento del cerebro de un chinoparlante, comprendería chino. Supongamos que el cerebro de una persona fuera simulado a nivel de neurona. Sin duda tal sistema comprendería el chino tan bien como el cerebro de cualquier persona china.

Y así sucesivamente.

Todas las objeciones anteriores tienen en común un mismo rasgo: todas son inadecuadas, porque todas le hurtan el cuerpo al verdadero argumento de la sala china. El mismo descansa en la distinción entre la manipulación formal de símbolos efectuada por el ordenador y los contenidos mentales que biológicamente existen en la mente, distinción que he abreviado —y espero no haber inducido a error a nadie— como distinción entre sintaxis y semántica. No repetiré las respuestas que di a todas estas objeciones, pero me parece que, para esclarecerlas, convendrá que explique las flaquezas de la objeción más difundida, la objeción c, a la que llamaré "concepción como sistema". (La réplica "simulación del cerebro", que constituye la objeción g, también es popular, pero ya la he examinado en la sección precedente.)

La réplica que llamo "concepción como sistema" afirma que, evidentemente, uno no comprende chino, pero que el sistema completo —uno mismo, la habitación, el libro de instrucciones, los cestos llenos de símbolos— sí lo entiende. La primera vez que oí esta explicación pregunté a uno de sus proponentes: "¿Pretende usted decir que la habitación comprende chino?". La respuesta fue afirmativa. No carece de osadía tal afirmación pero, amén de su implausibilidad, no funciona, por razones puramente lógicas. El punto esencial del argumento original estriba en que el mero entremezclado de símbolos no facilita acceso alguno a sus significados. Y eso vale tanto para la habitación entera como para la persona que se encuentra en su interior. Podemos ver que es así ampliando el experimento conceptual. Imaginemos que yo me aprendo de memoria el contenido de los cestos y todas las reglas del libro de instrucciones, y que soy capaz de efectuar mentalmente todos los cálculos que sean necesarios. Podemos imaginar incluso que trabajo a la vista de todos. Nada hay en el sistema que no se encuentre en mí y, dado que yo no entiendo chino, tampoco el sistema.

En su pieza conjunta, los Churchland exponen una variante de la réplica "concepción como sistema" imaginando una divertida analogía. Supongamos que alguien dijera que la luz no puede ser un fenómeno electromagnético porque, si uno agita un imán de barra en una habitación oscura, el sistema sigue sin producir luz visible. Ahora bien, preguntan los Churchland, ¿acaso no es idéntico a éste el argumento de la sala china? ¿No es cierto que se limita a decir que, al agitar símbolos chinos en una sala semánticamente oscura, no emitirán la luz de la comprensión del chino? Pero exactamente de la misma manera que la investigación posterior demostró que la luz estaba enteramente constituida por radiación electromagnética, ¿no podría ser que la investigación posterior pusiera de manifiesto que la semántica está enteramente constituida por sintaxis? ¿No es ésta cuestión digna de ulterior investigación científica?

Los argumentos por analogía son siempre de una debilidad notoria, pues para aplicar válidamente tales argumentos, hay que demostrar antes que los dos casos son verdaderamente análogos. Y aquí me parece que no lo son. La descripción de la luz como radiación electromagnética constituye una historia causal que va directamente a los fundamentos. Es una descripción causal de la física de la radiación electromagnética. Pero la analogía con los símbolos formales falla, porque los símbolos formales carecen de potencias físicas, causales. La única fuerza que poseen los símbolos, en tanto que símbolos, es la de provocar la ejecución del siguiente paso del programa cuando la máquina funciona. Y carece de sentido esperar que una investigación física más completa revele las propiedades físicas, causales, de los ceros y los unos. Las únicas propiedades relevantes de los ceros y los unos son sus propiedades computacionales abstractas, que ya son perfectamente conocidas.

Los Churchland se quejan de que "incurro en petición de principio" cuando afirmo que los símbolos formales no interpretados no son idénticos a contenidos mentales. Es cierto, desde luego, que no invertí el menor tiempo en justificar esta afirmación, pues la tomo por una verdad lógica. Y lo mismo que cualquier verdad lógica, podemos ver fácilmente que es cierta, porque, cuando tratamos de imaginar la contraria, surgen contradicciones. Probemos, pues. Supongamos que en la sala china está produciéndose verdaderamente un indetectable pensamiento en chino. ¿Qué es exactamente lo que se encarga de convertir la manipulación de los elementos sintácticos en contenidos de pensamiento específicamente chinos? Bueno, después de todo estoy suponiendo que los programadores eran chinohablantes, que programaron el sistema para procesar información en chino.

Estupendo. Pero ahora supongamos que, mientras estoy en la sala china manipulando los ideogramas chinos, me aburro de barajar esos símbolos, que para mí carecen de significado. Imaginemos, pues, que decido interpretar que los símbolos se refieren a jugadas de una partida de ajedrez. ¿Qué semántica está produciendo ahora el sistema? ¿Está entregando semántica china, semántica

ajedrecística o ambas a la vez? Supongamos que haya una tercera persona mirando por la ventana, y que esta persona llega a la conclusión de que mis manipulaciones de símbolos pueden interpretarse como predicciones para el mercado de valores. Y así sucesivamente. El número de interpretaciones semánticas que pueden atribuirse a los símbolos no tiene fin, porque, repitámoslo, los símbolos son puramente formales. Carecen de semántica intrínseca.

¿Hay alguna forma de rescatar la analogía de los Churchland y evitar que caiga en la incoherencia? Afirmé más arriba que los símbolos formales carecen de propiedades causales. Pero, desde luego, el programa tendrá que tomar cuerpo y ser ejecutado en alguna clase de sistema tangible, y este equipo físico poseerá propiedades físicas específicas y causales. Y todo ordenador real dará lugar a diversos fenómenos. Mis ordenadores, pongamos por caso, producen calor y emiten una especie de zumbido y, a veces, ruiditos ásperos. ¿Habrá, pues, una razón imperativa que les impida producir también consciencia? No. Científicamente, tal idea está descartada de antemano, pero ni es eso lo que el argumento de la sala china se propone refutar, ni tampoco es tesis que desee defender ninguno de los adherentes de la IA, pues tal generación de consciencia tendría que emanar de las características físicas del medio en que se materialice el programa. Pero la premisa básica de la IA fuerte es que las características materiales del medio soporte son totalmente irrelevantes. Lo que importa son los programas. Y los programas son puramente formales.

La analogía que los Churchland trazan entre sintaxis y electromagnetismo se enfrenta, pues, a un dilema: o bien la sintaxis está construida de manera puramente formal, en función de sus propiedades matemáticas abstractas, o no lo está. Si lo está, la analogía se rompe, porque la sintaxis está construida de forma tal que carece de potencias físicas y, por tanto, de potencias causales. Por otra parte, si uno se ve obligado a pensar en las características físicas del soporte que pone en práctica al programa, entonces existe verdaderamente una analogía, pero no una analogía que sea relevante para la IA fuerte.

Dado que las tesis que he estado defendiendo son bastante obvias —a saber, que la sintaxis no es lo mismo que la semántica, que los responsables de los procesos mentales son procesos cerebrales— se plantea esta otra cuestión: ¿cómo pudimos meternos en este embrollo? ¿Cómo ha podido nadie llegar a suponer que una simulación informática de un proceso mental tiene que ser un auténtico proceso mental? Después de todo, si la construcción de modelos tiene sentido es porque contienen solamente ciertas peculiaridades del objeto modelizado, haciendo caso omiso de las demás. Nadie espera salir mojado de una piscina llena de pelotas de ping-pong que hacen de modelo de las moléculas de agua. ¿Por qué, pues, se ha llegado a pensar que un modelo computarizado de los procesos de pensamiento pudiera verdaderamente pensar?

Parte de la respuesta está en que hemos heredado un residuo de las teorías psicológicas conductistas de la generación precedente. El test de Turing consagra y sacraliza la tentación de pensar que, si algo se comporta como si poseyera procesos mentales, entonces ha de poseer ciertamente tales procesos mentales. Noción que forma parte de una errónea presunción de los conductistas, a saber, que la psicología, para ser científica, ha de confinar su estudio a la conducta externamente observable. Paradójicamente, este conductismo residual está ligado a un dualismo residual. No hay nadie que crea que una simulación informática de la digestión digiera cosa alguna; en cambio, en lo que a la cognición concierne, la gente está dispuesta a creer en tal milagro, porque no alcanza a reconocer que la mente tiene tanto de fenómeno biológico como la digestión. La mente, suponen, es algo formal y abstracto, no una parte de la sustancia húmeda y escurridiza que ocupa nuestros cráneos. La literatura polémica de inteligencia artificial acostumbra contener ataques a algo que sus autores denominan dualismo; pero lo que éstos no alcanzan a ver es que ellos mismos están exhibiendo dualismo en una forma fuerte, pues, a menos que se acepte la idea de que la mente es completamente independiente del cerebro o de cualquier otro sistema físicamente específico, no cabe posibilidad alguna de crear mentes por mero diseño de programas.

Históricamente, en el mundo occidental, aquellos desarrollos científicos que han dado al hombre el tratamiento de mera parte del orden físico y biológico ordinario han solido tropezar con la oposición de diversas acciones retrógradas. Hubo oposición a Copérnico y a Galileo, porque negaron que la Tierra fuera el centro del universo; Darwin encontró oposición porque afirmó que los humanos descendían de animales inferiores. Lo mejor es considerar que la inteligencia artificial en sentido fuerte constituye una de las últimas boqueadas de esta tradición anticientífica, pues niega que, en lo atinente a la mente humana, haya nada cuyo carácter esencial sea físico o biológico. Según la IA fuerte, la mente es independiente del cerebro. Es un programa informático y, como tal, sin conexión específica con ningún ordenador específico.

Son muchas las personas que, teniendo dudas acerca del significado psicológico de la IA fuerte, consideran que los ordenadores podrían ser capaces de comprender el chino y de pensar en propiedades de los números, estándoles vedadas, en cambio, aquellas cosas crucialmente humanas, a saber (siguiendo aquí su especialidad humana favorita): enamorarse, tener sentido del humor, sentir la angustia de la sociedad postindustrial bajo el capitalismo tardío o lo que sea. Pero quienes trabajan en inteligencia artificial se quejan —justificadamente— de que lo que se está haciendo es llevar más allá los postes que señalan la meta. Tan pronto como una simulación artificial de inteligencia tiene éxito, deja de tener importancia psicológica. En este debate, a uno y otro bando se les escapa la distinción entre simulación y duplicación. Por lo que a la simulación concierne, no existe dificultad en programar un ordenador para que imprima "Te quiero, Loli", "¡Ja, ja, ja!", o "Estoy sufriendo la angustia de la sociedad postindustrial bajo el capitalismo tardío". Lo que importa es que la simulación no es lo mismo que la duplicación, y ese hecho reviste igual importancia, ya se trate de pensar en aritmética o de sentir angustia. La clave no está en que el ordenador apenas llegue a medio campo y no a la puerta contraria. Está en que el ordenador ni siquiera hace el saque; no está jugando a ese juego.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MIND DESIGN: PHILOSOPHY, PSYCHOLOGY, ARTIFICIAL INTELLIGENCE. Dirigido por John Haugeland. The MIT Press, 1980.

MINDS, BRAINS, AND PROGRAMS. John R. Searle en *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 3, n.º 3, págs. 417-458; 1980.

MINDS, BRAINS, AND SCIENCE. John R. Searle. Harvard University Press, 1984.

MINDS, MACHINES AND SEARLE. Stevan Harnad en *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, vol. 1, n.º 1, págs. 5-25; 1989.

¿Podría pensar una máquina?

Es inverosímil que la inteligencia artificial clásica alcance a producir máquinas conscientes; los sistemas que remedan al cerebro, tal vez sí

Paul M. Churchland y Patricia Smith Churchland

La investigación en inteligencia artificial está experimentando una revolución. Para explicar el cómo y el porqué, y al objeto de situar los argumentos de John R. Searle en perspectiva, será necesario echar primero la vista atrás.

A principios de los años cincuenta, la antigua y nebulosa pregunta de si podría pensar una máquina había dejado paso a otra más abordable, a saber: ¿podría pensar una máquina que manipulase símbolos obedeciendo a reglas sensibles a la estructura? La nueva pregunta suponía un avance porque la lógica formal y la teoría de computación habían conocido grandes progresos a lo largo del medio siglo precedente. Los teóricos habían llegado a apreciar la enorme potencia de los sistemas abstractos de símbolos sometidos a transformaciones gobernadas por reglas. Si resultase posible automatizar tales sistemas, su potencia computacional abstracta —pensaban— quedaría plasmada en un sistema físico y real. Tal idea engendró un programa de investigación de líneas bien definidas y profundos apoyos teóricos.

¿Podría pensar una máquina? Eran muchas las razones para afirmar que sí. Entre las más antiguas y profundas se contaban dos resultados de gran importancia en teoría de computación. Fue el primero la tesis de Church, que enuncia que toda función efectivamente computable es computable por recurrencia. Efectivamente computable significa que existe un procedimiento "de rutina" para determinar, en un tiempo finito, el egreso o "salida" de una función correspondiente a una determinada "entrada" o ingreso. Computable por recurrencia (o recursivamente computable) tiene un significado más específico, a saber, que existe un conjunto finito de operaciones aplicables a una entrada dada que, aplicadas luego una y otra vez a los sucesivos egresos de sí mismas, acaban produciendo la salida final de la función en tiempo finito. La noción de procedimiento de rutina es intuitiva y no formalizada; por consiguiente, la tesis de Church no admite una demostración formalizada. Pero sí va al meollo de lo que llamamos computar, y son muchas las pruebas que convergen en respaldo suyo.

El segundo de estos importantes resultados fue la demostración de Alan M. Turing, de que cualquier función computable por recurrencia puede ser computada en tiempo finito por una máquina manipuladora de símbolos de tipo maximalmente sencillo, máquina a la que se ha dado en llamar máquina universal de Turing. Se halla ésta guiada por un sistema de reglas recursivamente aplicables, sensibles a la identidad, orden y disposición de los símbolos elementales que ella encuentra con carácter de entradas.

Estos dos resultados comportan algo muy notable, a saber, que un ordenador digital típico, sin más que proveerle del programa adecuado, de suficiente memoria y de tiempo bastante, puede computar *cualquier* función, gobernada por reglas, que a una entrada le asocie una salida. Es decir, puede exhibir cualquier pauta sistemática de respuestas ante un ambiente, sea éste el que fuere.

Más específicamente, estos resultados implican que una máquina manipuladora de signos (máquina MS, en lo sucesivo), adecuadamente programada, debería ser capaz de superar el test de Turing para establecer la existencia de inteligencia consciente. El test de Turing constituye un criterio puramente conductista para comprobar la inteligencia consciente, pero aún así, el criterio que define es sumamente estricto. (La cuestión de si constituye un criterio idóneo se abordará más adelante, donde encontraremos un segundo y muy distinto "test" de inteligencia consciente.) En la versión original del test de Turing, los elementos proporcionados a la máquina MS consisten en preguntas y comentarios coloquiales mecanografiados a través de una consola (por usted o por mí, pongamos por caso), en tanto que las salidas son respuestas mecanografiadas procedentes de la máquina MS. La máquina supera el test de inteligencia consciente si resulta imposible distinguir sus respuestas de las mecanografiadas por una persona real e inteligente. Como es obvio, nadie conoce en el momento actual qué función generaría como salida la conducta de una persona consciente. Pero los resultados de Turing y Church nos aseguran que, cualquiera que fuese tal función (presumiblemente efectiva), una máquina MS podría computarla.

Se trata de una conclusión importante, sobre todo en vista de que la restricción impuesta por Turing, de que la interacción tenga lugar por teletipo, es una restricción innecesaria. Idéntica conclusión subsiste, aun cuando la máquina MS interactúe con

PAUL M. CHURCHLAND y PATRICIA SMITH CHURCHLAND son profesores de filosofía en la Universidad de California en San Diego. Han estudiado juntos la naturaleza de la mente y del conocimiento a lo largo de los dos últimos decenios. Paul Churchland se ha centrado sobre todo en la naturaleza y desarrollo del conocimiento científico, mientras que Patricia Churchland lo ha hecho en las neurociencias y en la forma en que el cerebro presta soporte a la cognición. *Matter and Consciousness*, de Paul Churchland, es el texto obligado sobre la filosofía de la mente; *Neurophilosophy*, de Patricia Churchland, ensambla y pone en contacto teorías de cognición procedentes tanto de la filosofía como de la biología. En la actualidad, Paul Churchland es decano de la Facultad de Filosofía de la UCSD, y los dos son, respectivamente, presidente y presidente saliente de la Sociedad de Filosofía y Psicología. Patricia Churchland es también profesora adjunta en el Instituto Salk de Estudios Biológicos en San Diego. Los Churchland pertenecen a la facultad de ciencia cognitiva de la UCSD, a su instituto de computación neural y al programa de estudios de ciencias.

el mundo por conductos más complejos: por visión directa, hablando real y verdaderamente, y así por demás. Después de todo, una función recursiva, aunque sea más compleja, sigue siendo computable por una máquina de Turing. El único problema subsistente estriba en identificar la función, indudablemente compleja, que gobierna la pauta de respuesta humana al ambiente y escribir después el programa (el conjunto de reglas recursivamente aplicables) mediante el cual la máquina MS la computará. Estas metas constituyen el programa fundamental de investigación de la inteligencia artificial clásica.

Los primeros resultados fueron positivos. Las máquinas MS, dotadas de sagaces programas, llevaron a cabo una variedad de actividades ostensiblemente cognitivas. Respondían a instrucciones complejas, resolvían complicados problemas aritméticos, lógicos y tácticos, jugaban a las damas y al ajedrez, demostraban teoremas y participaban en diálogos sencillos. Su ejecutoria siguió mejorando al aparecer memorias mayores y procesadores más rápidos, y merced a programas más largos y más sagaces. La inteligencia artificial clásica, la de "confección de programas", constituyó un esfuerzo de investigación vigoroso, fecundo en casi todos los campos. Las ocasionales negaciones de la posibilidad de que una máquina MS acabara pensando eran atribuidas a una información deficiente, cuando no a motivos impresentables. El alegato en favor de respuesta positiva a la pregunta que encabeza este artículo era abrumador.

Había, desde luego, unos cuantos enigmas. Para empezar, las máquinas MS no manifestaban gran parecido con un cerebro. No obstante, la concepción clásica tenía, incluso para esta objeción, una respuesta convincente. Primero, los materiales concretos que componen una máquina MS no guardan relación esencial alguna con la función que la máquina computa. Tal aspecto está determinado por el programa. En segundo lugar, los detalles técnicos de la arquitectura funcional de una máquina cualquiera son igualmente irrelevantes, pues arquitecturas muy diferentes que hacen funcionar programas muy distintos pueden, no obstante, estar computando la misma función de entrada-salida.

Consecuentemente, la inteligencia artificial se esforzó en hallar la *función* entrada-salida característica de la inteligencia, así como el más eficiente de los muchos programas posibles para computarla. La forma idiosincrática en que el cerebro pueda computar tal función carece pura y simplemente de importancia, se decía. Queda rematada así la justificación de la inteligencia artificial clásica y el porqué de la respuesta positiva a la pregunta del título.

¿Podría pensar una máquina? Se tenían también algunos argumentos para responder que no. A lo largo del decenio de 1960, eran relativamente raros los argumentos negativos dignos de interés. Se objetaba, de cuando en cuando, que el pensamiento era un proceso no físico en un alma inmaterial. Pero tal resistencia dualista no era ni evolutiva ni explicativamente plausible. Sus efectos sobre la investigación en inteligencia artificial fueron desdeñables.

Una línea de objeción completamente diferente logró llamar la atención de los especialistas con mucho más éxito. En 1972, Hubert L. Dreyfus publicó un libro sumamente crítico con las simulaciones de la actividad cognitiva de que se hacía gala por entonces. Expuso su inadecuación en tanto que simulaciones de la genuina

LA SALA CHINA

Axioma 1. Los programas informáticos son formales (sintácticos).

Axioma 2. Las mentes humanas tienen contenidos mentales (semántica).

Axioma 3. La sintaxis, de suyo, no es constitutiva de semántica ni suficiente para la misma.

Conclusión 1. Los programas no son constitutivos de la mente ni suficientes para la misma.

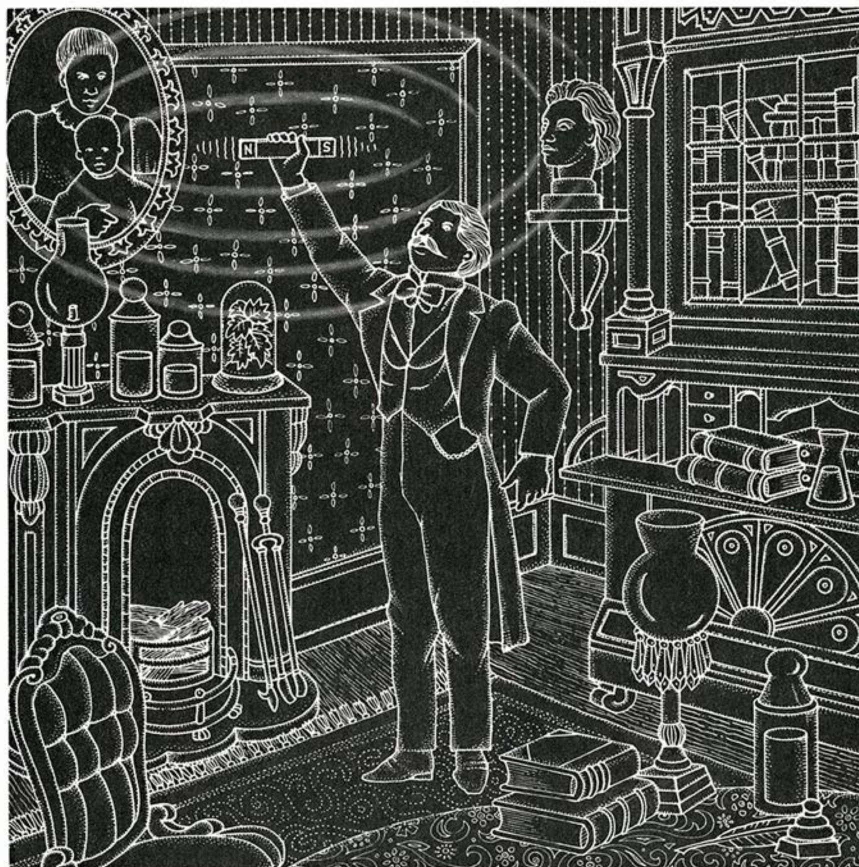
LA SALA LUMINOSA

Axioma 1. La electricidad y el magnetismo son fuerzas.

Axioma 2. La propiedad esencial de la luz es la luminancia.

Axioma 3. Las fuerzas, de suyo, no son constitutivas de luminancia ni suficientes para la misma.

Conclusión 1. La electricidad y el magnetismo no son constitutivos de la luz ni suficientes para la misma.



1. FUERZAS ELECTROMAGNETICAS OSCILANTES, que constituyen luz aun cuando un imán agitado por una persona no parezca producir luz en absoluto. Análogamente, una manipulación de símbolos basada en reglas pudiera constituir inteligencia, a pesar de que el sistema ubicado en la "sala china" diseñada por el filósofo John R. Searle parezca carecer de auténtica comprensión.

cognición, y señaló un fallo sistemático en dichas tentativas. Lo que se les estaba escapando, argüía Dreyfus, era la inmensa reserva de conocimientos básicos e inarticulados que toda persona posee, así como la facultad del sentido común, que la hace servirse de los aspectos relevantes de tal conocimiento, conforme lo van exigiendo las cambiantes circunstancias. Dreyfus no negaba la posibilidad de que alguna clase de sistema material artificial pudiera llegar a pensar, pero se mostró aceradamente crítico con la idea de que tal cosa pudiera lograrse exclusivamente por manipulación de símbolos a manos de reglas recursivamente aplicables.

Entre la comunidad de investigadores en inteligencia artificial, así como entre no pocos filósofos, las objeciones de Dreyfus fueron tenidas por miopes y antipáticas, por gemidos de plañidera ante las inevitables simplificaciones de un esfuerzo investigador muy joven todavía. Las insuficiencias apuntadas podrían ser reales, pero sin duda serían temporales. Máquinas más potentes y programas superiores se encargarían de subsanarlas, llegado el momento. El tiempo, estaban todos convencidos, caía del lado de la inteligencia artificial. En este caso, como en otros anteriores, sus efectos sobre la investigación fueron desdeñables.

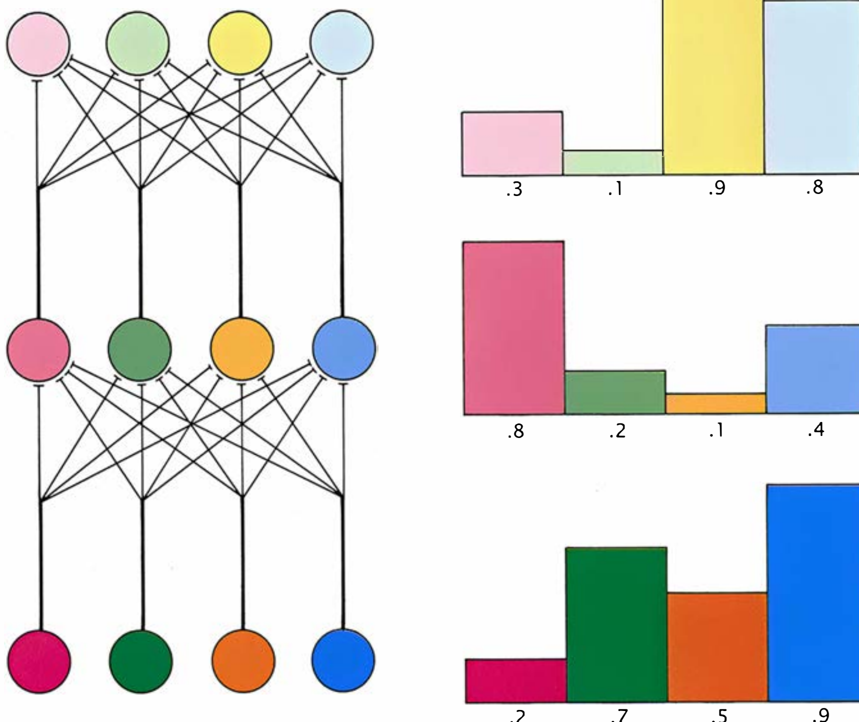
Pero el tiempo también estaba del lado de Dreyfus: la tasa de retorno cognitivo, a pesar de la creciente velocidad de los procesadores y del mayor tamaño de las memorias, comenzó a aflojar a finales del decenio de 1970 y en los primeros años ochenta. La simulación del reconocimiento de objetos por el sistema visual, pongamos por caso, demostró exigir un esfuerzo computacional de insospechada intensidad. La obtención de resultados realistas exigía períodos cada vez mayores de tiempo de ordenador, que excedían con mucho lo requerido por un sistema visual real. Esta relativa lentitud de las simulaciones resultaba a un tiempo curiosa y oscuramente desconcertante, pues la propagación de señales en el seno de un ordenador es aproximadamente un millón de veces más rápida que en el cerebro, y la frecuencia de reloj del procesador central de un ordenador supera la frecuencia de las señales detectadas en el cerebro en una magnitud igual de impresionante. Y sin embargo, en problemas del mundo real, la tortuga aventajaba a la liebre con toda facilidad.

Además, un funcionamiento realista exigía que el programa de ordenador tuviese acceso a una base de conocimientos ingente. La construcción de la base de conocimientos suponía ya un problema de primera magnitud, problema que se complicaba más todavía al tener que acceder en tiempo real a las partes contextualmente relevantes de dicha base de conocimientos. Cuanto más amplia y perfecta era la base de conocimientos, tanto más se complicaba el problema de acceso a ella. La exploración exhaustiva consumía un tiempo intolerable; las reglas heurísticas ideadas para reconocer los elementos relevantes dieron pobres resultados. Empezaron a encontrar cobijo acá y allá temores similares a los suscitados por Dreyfus, incluso entre los investigadores en inteligencia artificial.

Por aquel entonces (1980), John Searle concibió una crítica nueva, de naturaleza enteramente diferente, dirigida contra la hipótesis más fundamental de todo el programa clásico de investigación, a saber: la idea de que una adecuada manipulación de símbolos estructurados por aplicación recursiva de reglas sensibles a la estructura podría constituir inteligencia consciente.

La argumentación de Searle se funda en un experimento conceptual que exhibe dos características cruciales. Primero, Searle describe una máquina de manipulación de símbolos que realiza —hay que suponerlo— una función ingreso-egreso adecuada para sostener con éxito un diálogo capaz de superar el test de Turing. Este diálogo se desarrolla enteramente en chino. En segundo lugar, la estructura interna de la máquina es tal que, sea cual fuere su conducta, un observador puede tener la certeza de que ni la máquina, ni ninguna de sus partes, comprende chino. Todo cuanto contiene es un humano angloparlante y monóglota, que obedece ciegamente un conjunto de instrucciones escritas en su idioma, que le indican cómo manipular los símbolos chinos que recibe y emite a través de la rendija de un buzón. En breve, se supone que el sistema supera el test de Turing, pero el sistema propiamente dicho carece de genuina comprensión del chino o de auténtico contenido semántico chino [véase "¿Es la mente un programa informático?", por John R. Searle, artículo anterior].

De aquí se extrae la lección general siguiente: todo sistema que se limite a manipular símbolos físicos de acuerdo con reglas sensibles a la estructura será, en el mejor de los casos, un hue-



2. REDES NEURALES: modelizan una característica central de la microestructura cerebral. En esta red de tres niveles, las neuronas de entrada (*izquierda, abajo*) procesan una pauta de activaciones (*derecha, abajo*), que transfieren a lo largo de conexiones ponderadas hasta un estrato oculto. Los elementos del estrato oculto suman sus muchas entradas al objeto de producir una nueva pauta de activaciones. Este resultado se transfiere al estrato de salida, que efectúa una transformación adicional. Globalmente, la red transforma cualquier pauta de entrada en una pauta de salida correspondiente, dictada por la organización e intensidad de las numerosas conexiones entre neuronas.

co cascarón, remedo de la inteligencia real y consciente, porque es imposible generar "auténtica semántica" por vueltas y vueltas que se le dé a una "sintaxis vacía". En este punto, deberíamos señalarlo, Searle está imponiendo un criterio no conductista para la consciencia, a saber: que los elementos de la inteligencia consciente han de poseer contenido semántico real.

Siente uno la tentación de protestar, diciendo que el experimento conceptual de Searle hace trampa, porque su sistema efectuaría una computación de lamentable lentitud. No obstante, Searle declara con firmeza que la velocidad es estrictamente irrelevante en este punto. Un pensador lento seguiría siendo un auténtico pensador. Todo cuanto la inteligencia artificial clásica considera esencial para la duplicación del pensamiento se encuentra presente —afirma— en la sala china.

El artículo de Searle suscitó una viva reacción, tanto de los investigadores en inteligencia artificial, como entre los filósofos y psicólogos. En conjunto, sin embargo, fue recibido con mayor hostilidad aún que el artículo de Dreyfus. En su artículo de este número, Searle enumera directamente un buen número de tales críticas adversas. Pensamos que muchas de ellas son razonables, especialmente aquellas que "cogen el toro por los cuernos" al declarar con firmeza que, aunque el sistema sea de una lentitud desesperante, el sistema completo compuesto por la sala, más su contenido, comprende el chino.

Nosotros consideramos que son respuestas válidas, pero no porque creamos que la sala comprende el chino. Estamos de acuerdo con Searle en que no es así. Se trata de respuestas válidas porque reflejan la negativa a admitir el tercer y crucial axioma en que se basa el argumento de Searle: "*La sintaxis, por sí misma, no es constitutiva ni suficiente para la semántica*". Es posible que tal axioma sea verdadero, pero Searle no puede lícitamente pretender saber que lo es. Además, suponer su veracidad equivale a negar "a priori" y sin fundamento el programa de investigación de la inteligencia artificial clásica, un programa que resultó necesario a consecuencia de la muy interesante hipótesis de que, si se consiguiera poner en movimiento una danza interna de elementos sintácticos, adecuadamente estructurada, y adecuadamente conectada a entradas y salidas, se podrían producir los mismos estados cognitivos y los mismos logros que hallamos en los seres humanos.

El carácter de petición de principio del tercer axioma de Searle resulta claro al compararlo directamente con su conclusión 1: "*Los programas ni son constitutivos de mentes, ni suficientes para ellas*". Salta a la vista que su tercer axioma lleva ya el 90 por ciento del peso de esta conclusión casi idéntica. Por eso es por lo que el experimento conceptual de Searle está específicamente consagrado a apuntalar el axioma 3. Ahí reside la razón de ser de la sala china.

Aunque el cuento de la sala china hace que el axioma 3 resulte atractivo a los incautos, no creemos que logre establecerlo con éxito, y ofrecemos más adelante un argumento paralelo para ilustrar su fracaso. Con frecuencia, un ejemplo que muestre a las claras una falacia en un argumento puesto en entredicho suele proporcionar una comprensión mucho mayor que todo un libro minuciosamente lógico.

El estilo escéptico de Searle tiene abundoso precedente en la historia de la ciencia. En el siglo XVIII, al obispo irlandés George Berkeley le resultaba absolutamente ininteligible que las ondas de compresión en el aire pudieran, por sí solas, constituir sonido o ser causa suficiente de él. El poeta y pintor inglés William Blake y el poeta y naturalista alemán Johann W. von Goethe tenían por inconcebible que partículas diminutas pudieran por sí mismas constituir, o ser causa suficiente, del fenómeno objetivo que llamamos luz. Incluso en nuestro siglo, no han faltado quienes hayan considerado más allá de lo imaginable que la materia inanimada pudiera jamás llegar, por sí misma, a constituir vida o ser suficiente para la vida, cualquiera que fuere la forma en que estuviera organizada. Lisa y llanamente, lo que las personas podamos o no imaginar con frecuencia nada tiene que ver con lo que sucede, aun cuando las personas en cuestión sean sumamente inteligentes.

Para ver cómo se aplica esta lección al caso de Searle, vamos a examinar un argumento deliberadamente manufacturado por paralelismo con el suyo y con el experimento conceptual que lo respalda.

Axioma 1. *La electricidad y el magnetismo son fuerzas.*

Axioma 2. *La propiedad esencial de la luz es la luminancia.*

Axioma 3. *Las fuerzas, por sí mismas, ni son constitutivas de luz, ni suficientes para ella.*

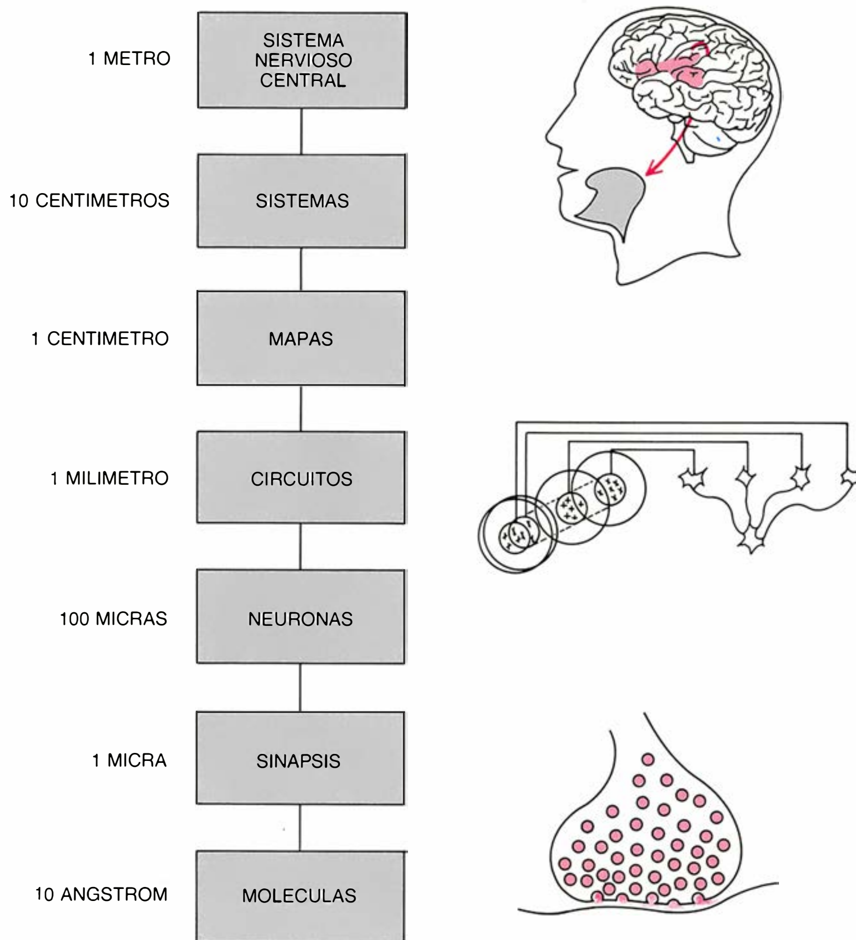
Conclusión 1. *La electricidad y el magnetismo no son ni constitutivas de luz ni suficientes para ella.*

Imaginemos que este argumento se plantea poco después de que James Clerk Maxwell propusiera, en 1864, que la luz y las ondas electromagnéticas son idénticas, pero antes de que el mundo pudiera apreciar plenamente los paralelismos sistemáticos entre las propiedades de la luz y las propiedades de las ondas electromagnéticas. El argumento anterior hubiera podido servir igualmente de convincente objeción a la imaginativa hipótesis de Maxwell, sobre todo, si, en apoyo del axioma 3, se añadiera el siguiente comentario.

"Imaginemos una sala oscura en cuyo interior se encuentra un hombre que sostiene un imán o un objeto eléctricamente cargado. Si el hombre agita el imán arriba y abajo, entonces, según la teoría de Maxwell de luminancia artificial (LA), activará círculos en expansión de ondas electromagnéticas y, por consiguiente, se hará luminoso. Pero como sabemos bien todos quienes hemos jugado con imanes o bolas cargadas, sus fuerzas (ni puestos a ello, ningunas otras) no producen luminancia alguna, ni siquiera en movimiento. ¡Resulta inconcebible que se pudiera hacer surgir auténtica luminancia por mero movimiento de fuerzas de acá para allá!"

¿Cómo respondería Maxwell a semejante objeción? Podría empezar insistiendo en que el experimento de la "sala luminosa" constituye una presentación errónea del fenómeno de luminancia, porque la frecuencia de oscilación del imán es de una pequeñez ridícula, unas 10^{15} veces demasiado pequeña. Su respuesta podría provocar la impaciente réplica de que la frecuencia nada tiene que ver con la cuestión, que la sala más su imán oscilante contienen ya todo cuanto es esencial para la luz, según la propia teoría de Maxwell.

Maxwell, en su respuesta, podría tomar el toro por los cuernos y proclamar, con toda razón, que la sala se encuentra ya bañada en luminancia, aunque en un grado o cualidad demasiado débil para ser apreciada. (Dada la baja frecuencia con que el hombre puede agitar el imán, la longitud de onda de las ondas electromagnéticas producidas es demasiado larga, y su intensidad demasiado débil, para que las retinas humanas sean sensibles a ellas.) Pero en el clima de incomprensión que aquí estamos contemplando —el decenio de 1860—, lo más verosímil es que su táctica hubiera provocado risas y befas. "¡De luminancia nada, señor Maxwell! ¡Esto está más oscuro que la pez!"



3. ORGANIZACION de los sistemas nerviosos. Abarca muchas escalas, desde las moléculas neurotransmisoras (*abajo*) hasta el cerebro entero y la médula espinal. En los niveles intermedios, se cuentan las neuronas individuales y los circuitos compuestos por unas pocas neuronas, como las que producen selectividad de orientación ante un estímulo visual (*centro*) y sistemas compuestos por circuitos como los que sirven al lenguaje (*arriba, derecha*). Unicamente la investigación podrá decidir hasta qué punto ha de remedar un sistema artificial al sistema biológico para ser capaz de inteligencia.

Lástima, el pobre Maxwell no tiene una salida fácil del apuro en que se encuentra. Lo más que puede hacer es insistir en los tres puntos siguientes. Primero, el axioma 3 del argumento precedente es falso. En efecto, a pesar de su intuitiva plausibilidad, es circular, incurre en petición de principio. Segundo, el experimento de la sala luminosa no pone de manifiesto nada de interés acerca de la naturaleza de la luz, ni en un sentido ni en el contrario. Y en tercer lugar, lo que hace falta para zanjar el problema de la luz y de la posibilidad de luminancia artificial es un programa continuado de investigación, que determine si, en condiciones apropiadas, el comportamiento de las ondas electromagnéticas reproduce exactamente la conducta de la luz.

No otra sería la respuesta que la inteligencia artificial clásica tendría que oponer al argumento de Searle. Aun cuando la sala china de Searle parezca ser "semánticamente oscura", no se encuentra en posición de sostener a toda costa, basándose en la fuerza de esta apariencia, que la manipulación de símbolos gobernada por reglas no pueda jamás llegar a constituir fenómenos semánticos, en especial, cuando sólo se tiene una comprensión poco informada, "de sentido común", de los fenómenos semánticos y cognitivos que es preciso explicar. Más que sacar partido de la comprensión que de tales asuntos se tiene, el argumento de Searle explota libremente la ignorancia misma de ellos.

Situadas en su lugar estas críticas de Searle, volvemos a la cuestión de si el programa de investigación de la inteligencia artificial clásica tiene posibilidades verosímiles de resolver el problema de la inteligencia consciente y de producir una máquina que piense. Estamos convencidos de que es muy inverosímil que así sea, pero nuestra opinión se funda en razones muy distintas de las de Searle. Nuestras razones provienen de los fallos específicos de rendimiento del programa de investigación clásico en inteligencia artificial, así como de una variedad de lecciones que nos han enseñado el cerebro biológico y una nueva clase de modelos computacionales inspirados en su estructura. Hemos indicado ya algunos de los fracasos de la inteligencia artificial clásica en tareas que el cerebro realiza con rapidez y eficacia. Estos fracasos están dando pie al consenso de que la arquitectura funcional de las máquinas MS clásicas es simplemente inadecuada para las enormes exigencias de las tareas pretendidas.

Lo que necesitamos saber es: ¿cómo logra cognición nuestro cerebro? Es común en la industria la ingeniería retroactiva. Cuando sale al mercado un nuevo producto, los competidores se esfuerzan por averiguar cómo funciona desmontándolo y tratando de adivinar las causas de su estructura. En el caso del cerebro, las dificultades que esta estrategia plantea son impresionantes, pues el cerebro es el objeto más complicado y perfecto que hay en el planeta. Incluso así, las neurociencias han revelado mucho acerca del cerebro en una amplia variedad de niveles estructurales. Tres aspectos de su anatomía nos servirán de elementos de contraste con los ordenadores electrónicos tradicionales.

Ante todo, los sistemas nerviosos son máquinas en paralelo, en el sentido de que las señales se procesan simultáneamente en millones de sendas diferentes. La retina, por ejemplo, presenta al cerebro sus complejas señales de entrada no en bloques de 8, 16 o 32 elementos, como en un ordenador de sobremesa, sino más bien en forma de casi un millón de elementos distintos que llegan simultáneamente a una diana constituida por el nervio óptico (el núcleo lateral geniculado), donde se procesan, conjunta y simultáneamente, de un solo golpe. En segundo lugar, la unidad fundamental de procesamiento del cerebro, la neurona, es, en comparación, sencilla. Además, su respuesta a las señales que en ella ingresan no es digital, sino analógica, en la medida en que la frecuencia de los picos de salida varía continuamente con las señales que recibe como entrada. En tercer lugar, en el cerebro, los axones que emanan de una población neuronal a otra suelen ir acompañados de axones que retornan desde la población destinataria. Estas proyecciones descendentes o recurrentes permiten al cerebro modular el carácter de su procesamiento sensorial. Y lo que es aún más importante, su existencia convierte al cerebro en un sistema dinámico genuino, cuya conducta es a

un tiempo sumamente compleja y, hasta cierto punto, independiente de sus estímulos periféricos.

Al objeto de sugerir cuál podría ser el funcionamiento de las redes nerviosas reales, y de revelar las propiedades computacionales de las arquitecturas en paralelo, han resultado útiles ciertos modelos reticulares sumamente simplificados. Fijémonos, por ejemplo, en un modelo en tres estratos, compuesto por unidades neuromorfas plenamente interconectadas a las unidades de la capa siguiente por conexiones similares a los axones. La llegada de un estímulo produce cierto nivel de activación en una determinada unidad de entrada, la cual provoca la transmisión a lo largo de su "axón" de una señal de fuerza proporcional, hasta sus muchas conexiones "sinápticas" con las unidades ocultas. El efecto global es el siguiente: una pauta de activaciones a través del sistema de unidades de entrada produce una pauta distinta de activaciones a través del sistema de unidades ocultas.

Otro tanto vale para las unidades de salida. Lo mismo que antes, una pauta de excitaciones a través de las unidades ocultas induce una pauta de activación diferente a través de las unidades de salida. En conjunto, esta red constituye un dispositivo para transformar unívocamente cualquiera de los muchos posibles vectores de entrada (pautas de excitación) en un solo vector de salida correspondiente a esa entrada. Es un dispositivo para computar una función específica. La función exacta que se computa está fijada por la configuración global de sus pesos sinápticos.

Existen varios procedimientos para ajustar los pesos de manera que resulte una red capaz de computar casi cualquier función —esto es, cualquier transformación de vector en vector— que uno pudiera desear. De hecho, resulta posible incluso imponer a la red una función que uno es incapaz de especificar, con tal de que sea posible suministrarle un conjunto de ejemplos de los pares de entrada-salida deseados. Este proceso, al que se ha dado el nombre de "entrenamiento de la red", se desarrolla por ajuste sucesivo de los pesos de la red, hasta que realiza las transformaciones entrada-salida deseadas.

A pesar de que este modelo reticular sea una inmensa y burda simplificación de la estructura del cerebro, permite ilustrar varias ideas importantes. En primer lugar, una arquitectura en paralelo proporciona un fenomenal aumento de velocidad sobre un ordenador convencional, pues la multitud de sinapsis de cada nivel ejecutan simultáneamente muchos pequeños cómputos, en lugar de hacerlo en laboriosa sucesión. Esta superioridad se acrecienta conforme aumenta el número de neuronas de cada estrato. Sorprendentemente, la velocidad de procesamiento es independiente, no sólo del número de unidades que en cada estrato intervienen en él, sino también de la complejidad de la función que están ejecutando. Cada estrato podría tener cuatro unidades o cien millones; su configuración de pesos sinápticos lo mismo podría estar computando sencillas sumas de una cifra que ecuaciones diferenciales de segundo orden. No habría ninguna diferencia. El tiempo de cómputo sería exactamente el mismo.

En segundo lugar, un paralelismo a gran escala comporta que el sistema muestra tolerancia a los fallos y es funcionalmente persistente; la pérdida de unas cuantas conexiones, incluso de bastantes, ejerce efectos despreciables sobre el carácter de la transformación global que lleva a cabo la porción de red superviviente.

Y en tercer lugar, un sistema en paralelo almacena grandes cantidades de información de modo distribuido, cualquiera de cuyas partes es accesible en milésimas de segundo. Dicha información está almacenada en la configuración específica de las intensidades de conexión sinápticas, a las que ha dado forma el aprendizaje pasado. La información relevante se va "liberando" conforme el vector de entrada pasa a través de esa configuración de conexiones (al tiempo que se ve transformado por ella).

El procesamiento en paralelo no resulta ideal para todos los tipos de computación. En aquellas tareas que solamente requieren un pequeño vector de entrada, sobre el que han de efectuarse muchos millones de cómputos recursivos rápidamente iterados, el cerebro tiene muy mal rendimiento; el de las máquinas clásicas de manipulación simbólica, en cambio, es excelente. La clase de cómputos pertenecientes a esta categoría es muy grande e importante, por lo que las máquinas clásicas serán siempre útiles; más aún: vitales. Existe, empero, una clase no menos amplia de cómputos para los cuales la arquitectura cerebral constituye una tecnología, con mucho, superior. Son éstos los cómputos que típicamente han de afrontar los seres vivos: reconocer el perfil de un depredador en un ambiente ruidoso; recordar instantáneamente cómo ocultarse de su mirada, huir ante su aproximación o esquivar su ataque; distinguir lo que es alimento de lo que no, con quiénes aparearse y con quiénes no; navegar a través de un ambiente social y material complejo y siempre cambiante, etc.

Por último, importa señalar que el sistema paralelo recién descrito no está manipulando símbolos de acuerdo con reglas sensibles a estructura. Parece, más bien, que la manipulación de símbolos no es más que una de las muchas destrezas cognitivas que una red puede o no aprender a manifestar. La manipulación de símbolos gobernada por reglas no constituye su modo fundamental de funcionamiento. El argumento de Searle va directamente dirigido contra las máquinas de manipulación simbólica gobernadas por reglas; las máquinas de transformación vectorial del tipo que estamos describiendo no estarían, por tanto, amenazadas por su argumento de la sala china, aun suponiéndolo válido, validez que ha quedado en entredicho por razones de otra naturaleza.

Searle sabe de los procesadores en paralelo, pero considera que también éstos se encontrarán faltos de contenido semántico. Como ilustración de su inevitable fracaso, ha concebido un segundo experimento mental, el gimnasio chino, que consiste en un gimnasio lleno de personas organizadas según una red en paralelo. A partir de este punto, su argumento reza como en la sala china.

Encontramos esta segunda historia mucho menos convincente que la primera. Para empezar, es irrelevante que ninguna de las unidades de su sistema comprenda el chino, pues otro tanto vale para los sistemas nerviosos: ninguna de las neuronas de mi cerebro entiende el inglés, pero mi cerebro completo, sí. En segundo lugar, Searle olvida mencionar que su simulación (utilizando una persona por neurona, más un chiquillo de pies ligeros por cada conexión sináptica) exigiría, al menos, 10^{14} personas, dado que el cerebro humano tiene alrededor de 10^{11} neuronas, cada una de las cuales tiene, por término medio, más de 10^{3} conexiones. Su sistema exigiría las poblaciones humanas completas de más de 10.000 Tierras. Un gimnasio ni siquiera comenzaría a alojar una simulación aceptable.

Por otra parte, si tal sistema hubiera de construirse a una escala cósmica adecuada, fielmente modelizadas con humanos todas sus sendas e interconexiones, podríamos tener entonces entre manos un cerebro grande, lento, curiosamente diseñado, pero aun así funcional. En tal caso, la presunción fundamental es, sin duda, que, proporcionándole a tal sistema

las entradas adecuadas, podría pensar, y no lo contrario. No existen garantías de que su actividad fuera a constituir auténtico pensamiento, porque la teoría de procesamiento vectorial antes esbozada pudiera no constituir una teoría correcta del funcionamiento del cerebro. Pero tampoco existe, "a priori", ninguna garantía de que no pudiera estar pensando. Searle está, una vez más, confundiendo los límites de su capacidad de imaginación actual (o los del lector) con los límites de la realidad objetiva.

El cerebro es una especie de ordenador, pero casi todas sus propiedades están por descubrir. Caracterizar al cerebro como una especie de ordenador no es ni trivial ni frívolo. Es efectivamente cierto que el cerebro computa funciones, de gran complejidad, pero no a la manera de la inteligencia artificial clásica. Cuando se dice que los cerebros son ordenadores, no se debería suponer que se trata de máquinas digitales, seriales, que son programadas, que en ellas están claramente separados el equipo físico y el soporte lógico, ni que han de ser manipuladoras de símbolos en obediencia a reglas. Los cerebros son ordenadores en un estilo radicalmente diferente.

La forma en que el cerebro maneja significados es todavía desconocida, pero está claro que el problema trasciende el uso del lenguaje y de los humanos. Para una persona, un montoncito de tierra recién excavada significa que por allí anda un topo, pero lo mismo significa para un zorro; un eco de cierto carácter espectral le significa al murciélago la presencia de una mariposa nocturna. Para desarrollar una teoría del significado, es imprescindible saber más acerca de cómo las neuronas codifican y transforman las señales sensoriales, acerca de la base neuronal de la memoria, del aprendizaje y de la emoción y acerca de la interacción de estas facultades con el sistema motor. Una teoría del significado de fundamento neuronal puede exigir la revisión de las intuiciones mismas que hoy parecen tan seguras y de las que tan libremente se saca partido en los argumentos de Searle. Las revisiones de este tipo son cosa corriente en la historia de la ciencia.

¿Podría la ciencia construir una inteligencia artificial sacando partido de lo que ya se conoce sobre el sistema nervioso? No vemos en principio razón alguna para decir que no. Searle parece estar de acuerdo, aunque matiza su afirmación diciendo que "cualquier otro sistema capaz de causar mentes habría de tener potencias causales equivalentes (cuando menos) a las de los cerebros". Concluiremos nuestro artículo examinando esta afirmación. Presumimos que Searle no está afirmando que una mente artificial satisfactoria ha de poseer la totalidad de las potencias causales del cerebro, como la de oler mal al descomponerse, la de albergar virus lentos como el kuru, de mancharse de amarillo con la peroxidasa de rábano picante, etcétera. Exigir una paridad perfecta sería como exigir que un artefacto de vuelo artificial pusiera huevos.

Presumiblemente, su sola intención es exigir a una mente artificial la totalidad de las potencias causales pertinentes, como él dice, a la inteligencia consciente. Pero, ¿cuáles son éstas, exactamente? Hemos de volver a discutir qué es lo importante y qué no lo es. Es razonable que en este punto existan desacuerdos, pero se trata de una cuestión empírica, que es preciso ensayar y someter a prueba. Como es tan poco lo que se sabe acerca de los elementos que intervienen en el proceso de cognición y en la semántica, resulta prematuro mostrar una gran confianza acerca de cuáles son los rasgos esenciales. Searle indica en diversos puntos que cada nivel, incluido el bioquímico, habría de hallarse representado en cualquier máquina que aspirase a poseer inteligencia artificial. Esta afirmación es, sin duda, demasiado fuerte. Un cerebro artificial podría utilizar elementos no bioquímicos para conseguir los mismos fines.

Vemos ilustrada tal posibilidad en las investigaciones de Carver A. Mead, del Instituto de Tecnología de California. Mead y sus colegas se han valido de técnicas VLSI (integración a muy gran escala) de circuitos analógicos para construir una retina y una cóclea artificiales. (En los animales, la retina y la cóclea no son meros transductores; ambos sistemas incorporan una compleja red de procesamiento.) No se trata de meras simulaciones en un miniordenador, como las que Searle desdeña; se trata de auténticas unidades de procesamiento de información que responden en tiempo real a la luz real, en el caso de la retina artificial, y a sonidos reales, en el de la cóclea artificial. Sus circuitos se basan en lo que ya se conoce acerca de la anatomía y fisiología de la retina del gato y de la cóclea de la lechuza, y su respuesta es asombrosamente similar a la de los órganos en cuestión.

Estos microcircuitos no utilizan para nada elementos bioquímicos, por lo que es obvio que éstos no son necesarios para lograr los resultados que a la vista están. Desde luego, no se puede decir que la retina artificial esté viendo nada, porque su salida no tiene un tálamo o córtex visual artificial a la que ser encaminada. Está por ver si el programa de Mead podría continuarse hasta la construcción de todo un cerebro artificial, pero no hay prueba alguna de que su carencia de elementos bioquímicos convierta el proyecto en una entelequia.

Nosotros, lo mismo que Searle, rechazamos que el test de Turing constituya una condición suficiente para la inteligencia consciente. Hay un nivel en el que nuestras razones para tal rechazo son similares: coincidimos en que también es muy importante cómo se logre la función de entrada-salida; es importante que en el interior de la máquina artificial acontezcan las cosas correctas. A otro nivel, nuestras razones son totalmente diferentes. Searle funda su posición en intuiciones de sentido común relativas a la presencia o ausencia de contenido semántico. Nosotros basamos las nuestras en fallos conductuales específicos de las máquinas clásicas de manipulación de símbolos, y en las virtudes específicas de máquinas de arquitectura más cerebriforme. Estos contrastes muestran que ciertas estrategias computacionales poseen inmensas y decisivas ventajas sobre otras, en lo que a tareas cognitivas concierne, ventajas que son empíricamente inescapables. Como es obvio, el cerebro está haciendo uso sistemático de estas ventajas computacionales. Pero no tiene por qué ser el único sistema físico que lo haga. La inteligencia artificial, en una gran máquina no biológica de funcionamiento en paralelo, sigue constituyendo una perspectiva tan apremiante como discernible.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

COMPUTING MACHINERY AND INTELLIGENCE. Alan M. Turing en *Mind*, vol. 59, págs. 433-460; 1950.

WHAT COMPUTERS CAN'T DO; A CRITIQUE OF ARTIFICIAL REASON. Hubert L. Dreyfus. Harper & Row, 1972.

NEUROPHILOSOPHY: TOWARD A UNIFIED UNDERSTANDING OF THE MIND/BRAIN. Patricia Smith Churchland. The MIT Press, 1986.

FAST THINKING en *The International Stance*. Daniel Clement Dennett. The MIT Press, 1987.

A NEUROCOMPUTATIONAL PERSPECTIVE: THE NATURE OF MIND AND THE STRUCTURE OF SCIENCE. Paul M. Churchland. The MIT Press, en prensa.

ARN y ADN antisentido

Moléculas que hibridan con ARN mensajeros específicos pueden inactivar genes selectivamente. Ciertas enfermedades podrían ser tratadas con estas moléculas. Constituyen ya valiosas herramientas para la investigación

Harold M. Weintraub

Se necesitan unos 100.000 genes para construir un ser humano. Pero, ¿qué es lo que hacen? ¿De qué modo lo realizan? Para responder a estas preguntas los biólogos actúan sobre genes individuales, eliminándolos o inactivándolos, y observan los efectos producidos en organismos o en células aisladas. Los estudios mutacionales han proporcionado tradicionalmente este tipo de información, aunque las mutaciones, por su propia naturaleza, son aleatorias; por ello, los estudios sistemáticos sobre genes individuales son difíciles (o imposibles en el caso de los seres humanos y otros organismos de larga esperanza de vida).

Tras el advenimiento, en la última década, de las técnicas para clonar o multiplicar genes es posible, ahora, pensar de forma realista en la inactivación o modificación selectiva de la actividad de cualquier gen. Uno de los métodos reviste, en principio, particular sencillez; me refiero a la creación de moléculas de ADN o ARN antisentido que hibriden específicamente con el ARN mensajero de un gen diana, bloqueando así la fina maquinaria molecular mediante la cual un gen se expresa en una proteína. Los virus y bacterias regulan de ese modo algunos genes durante sus ciclos vitales. Hoy podemos aplicar este tipo de enfoque al estudio de un amplio espectro de problemas.

HAROLD M. WEINTRAUB trabaja en la división de ciencias básicas del Centro Fred Hutchinson para la Investigación del Cáncer, en Seattle. Se doctoró en la facultad de medicina de la Universidad de Pennsylvania en 1971. Tras completar su trabajo postdoctoral en el Consejo de Investigaciones Médicas de Cambridge, Inglaterra, pasó cuatro años en la Universidad de Princeton, en el departamento de bioquímica. En la actualidad sus investigaciones se centran en la regulación génica y el desarrollo.

La posibilidad de desactivar genes específicos abre grandes esperanzas en el campo de la medicina. Algún día, se espera, combatiremos enfermedades víricas con moléculas de ADN y ARN antisentido que busquen y destruyan los productos de genes víricos en el interior de las células del organismo de una persona. Estas aplicaciones están todavía en pañales. Mientras tanto, la tecnología basada en las moléculas antisentido contribuye al nacimiento de un nuevo campo, la genética inversa. Los estudios genéticos clásicos se basan normalmente en la mutagénesis aleatoria de todos los genes de un organismo, seleccionándose aquellas mutaciones que determinan características específicas; la genética inversa comienza con un gen clonado, y lo manipula para extraer información sobre su función.

La aproximación genética tradicional utiliza agentes químicos o radiaciones para anular o alterar genes de forma aleatoria. Entre los organismos o células tratadas, y sus descendientes, se estudian los mutantes que presenten características de interés para el experimentador. El enfoque genético ha resultado decisivo en el estudio de microorganismos, plantas y animales invertebrados. Sin embargo, es poco adecuado para estudiar vertebrados. Los vertebrados tienen un período de generación excesivamente largo; su descendencia suele ser corta, lo que limita la obtención rápida de mutantes de interés, y la mayoría de las mutaciones que importan acostumbran ser letales y, por tanto, difíciles de estudiar y propagar.

Otro inconveniente de cualquier aproximación genética es que los efectos observables de una mutación pueden no revelar con precisión la naturaleza de dicha mutación. Por ejemplo, una mutación puede traducirse en la disminución de la capacidad de un microorganismo de crecer en presencia de cierta fuente de azúcar. ¿Está alterando la mutación a la enzima que digiere el azúcar, o está bloqueando la entrada de dicho azúcar en la célula? ¿Está quizás activando enzimas que almacenan el azúcar, en vez de digerirlo? Por sí sola, la genética no puede suministrar la respuesta; puede identificar el conjunto de genes que intervienen en un proceso; mas, para saber lo que hace un gen en particular se precisa, a menudo, la intervención de otras disciplinas. La técnica de las moléculas antisentido intenta superar algunas de tales limitaciones.

Para entender cómo funciona esta nueva metodología, hemos de empezar por revisar los conceptos fundamentales de la estructura y expresión génica. Un gen es un programa cifrado para fabricar una proteína; la información viene dada por la secuencia ordenada de las cuatro bases nucleotídicas que conforman las moléculas de ADN: adenina (*A*), timina (*T*), guanina (*G*) y citosina (*C*). En la secuencia de bases de una cadena de ADN se establecen fuertes enlaces entre las bases. Se pueden trabar otros enlaces, más débiles, entre bases de cadenas distintas; en este caso, *A* se une con *T* y *G* con *C*.

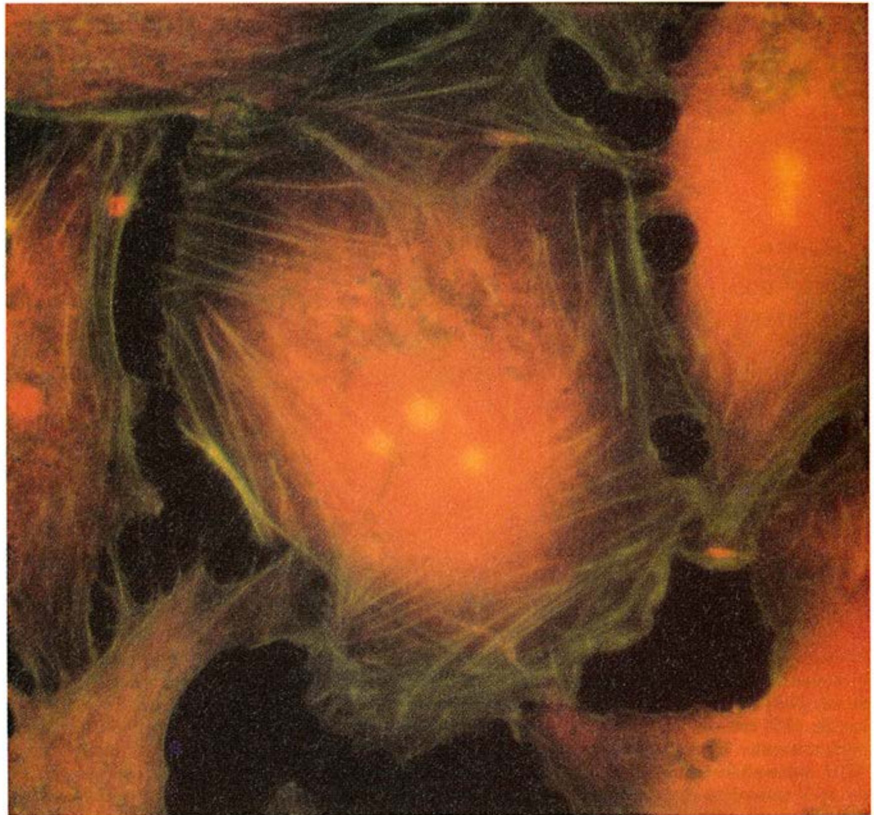
Por esta razón, el ADN de los organismos se presenta, por lo común, en doble hélice, en dúplex: formado por dos cadenas de ADN entrelazadas. En cada dúplex, una base de una de las cadenas establece su enlace correspondiente con su base complementaria de la otra cadena. Por ejemplo, una secuencia "con sentido" que se lea *A-T-G-C-T-C* en una cadena, se empareja con otra "antisentido", *T-A-C-G-A-G*, en la otra cadena. La alta especificidad del emparejamiento de bases adquiere importancia durante la replicación del ADN, cuando las dos cadenas complementarias de cada dúplex se separan: cada cadena sirve de molde para reconstruir su pareja, y obtener así dos dúplices idénticos.

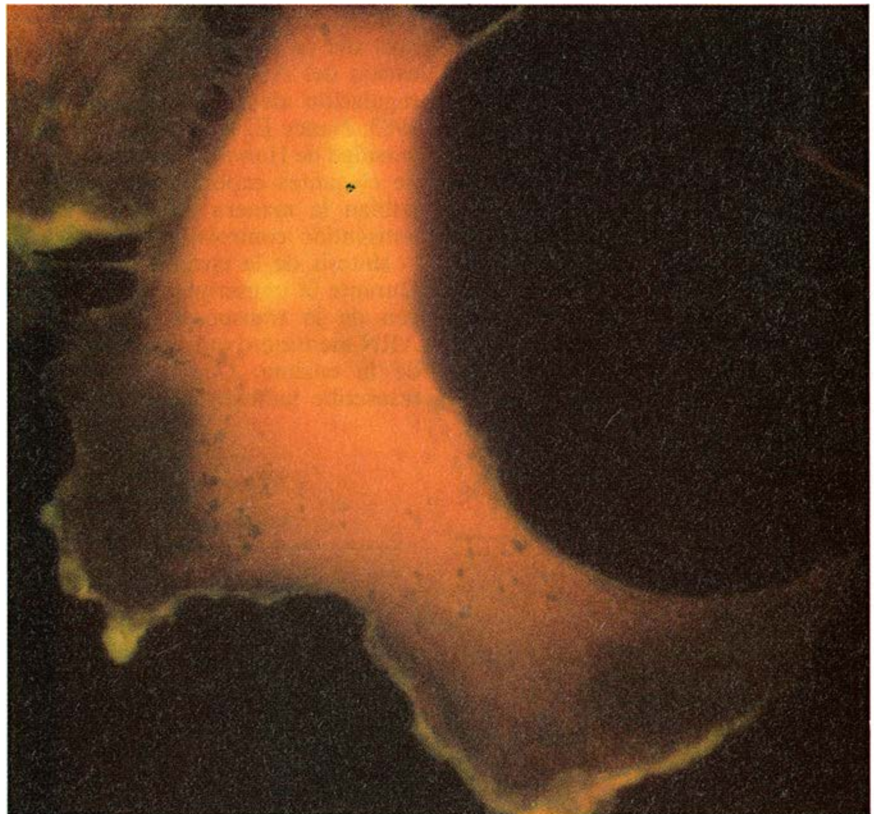
La especificidad del emparejamiento de bases reviste también interés a la hora de descifrar la información genética necesaria para fabricar las proteínas. El ADN no sintetiza las proteínas directamente. La síntesis depende de una molécula intermediaria, el ARN. El ARN está constituido por las mismas bases que el ADN, con la salvedad de que se sustituye la *T* por el uracilo (*U*), que también puede emparejarse con *A*. Durante la transcripción, primera etapa en la lectura de la información, la cadena con sentido de un gen se separa de su compañera, la cadena antisentido. Intervienen a continuación unas enzimas que fabrican una molécula de ARN complementaria de la secuencia de la cadena de ADN antisentido. Este ARN mensajero emigra finalmente hacia los ribosomas, estructuras celulares que leen la información cifrada y juntan los aminoácidos apropiados para componer la poteína correspondiente.

La cadena de ADN antisentido de los genes sirve de molde para el ARN mensajero; el ARN mensajero porta la información estructural para fabricar una proteína. Pero, ¿qué ocurre con la cadena de ADN con sentido? ¿Produce ARN antisentido? Si así es, ¿cuál es su función?

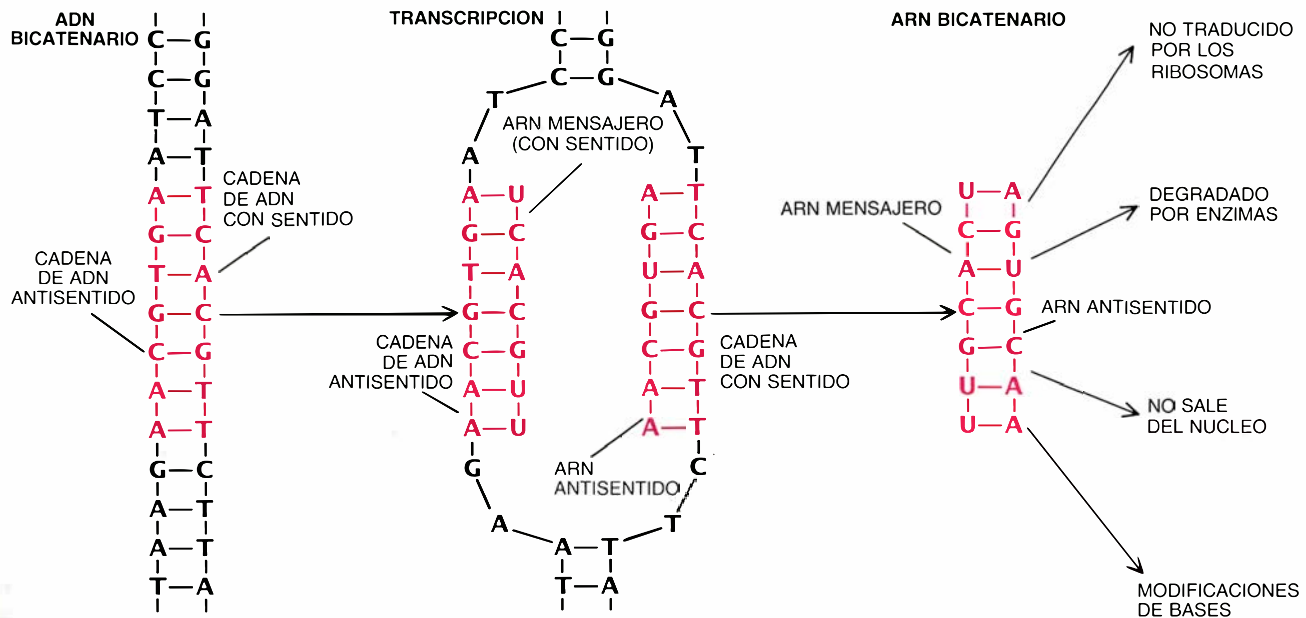
Un importante descubrimiento sobre la naturaleza de la función biológica de las moléculas de ARN antisentido se remonta a 1981, realizado por Jun-ichi Tomizawa, en el Instituto Nacional de la Salud (NIH). Tomizawa estudiaba la replicación de un plásmido, pequeño anillo de ADN bicatenario bacteriano, denominado ColE1. En este plásmido la replicación del ADN comienza por una secuencia específica: el origen. En primer lugar, el cebador, una breve cadena de ARN, abre la doble hélice de ADN e hibrida, se empareja, con el origen. La enzima polimerasa de ADN añade entonces las bases *A*, *T*, *C* y *G* correspondientes tras el cebador de ARN, construyendo así una nueva cadena de ADN que es complementaria a la que contiene el origen. El número de copias que se fabrican del plásmido depende del número de cebadores de ARN disponibles en el interior celular.

Tomizawa descubrió que la disponibilidad de cebadores de ARN no estaba controlada por su concentración total, sino por la relación entre cebadores y moléculas inhibidoras específicas. Demostró que tales inhibidores eran moléculas de ARN transcritas a partir de la cadena de ADN complementaria a la que produce el





1. MOLECULAS DE ARN ANTISENTIDO inhiben selectivamente la actividad de los genes y bloquean la producción de proteínas específicas en las células vivas. En este sentido, células cultivadas normales (*arriba*) fabrican un entramado de finos filamentos estructurales (*verde*) de proteína actina; merced a esos filamentos las células presentan una forma lisa. Las células inyectadas con ARN antisentido de la actina (*abajo*) pierden parte de su entramado de actina y quedan aplanadas. Las técnicas que se fundan en las moléculas antisentido permiten sondear las funciones de genes aislados.



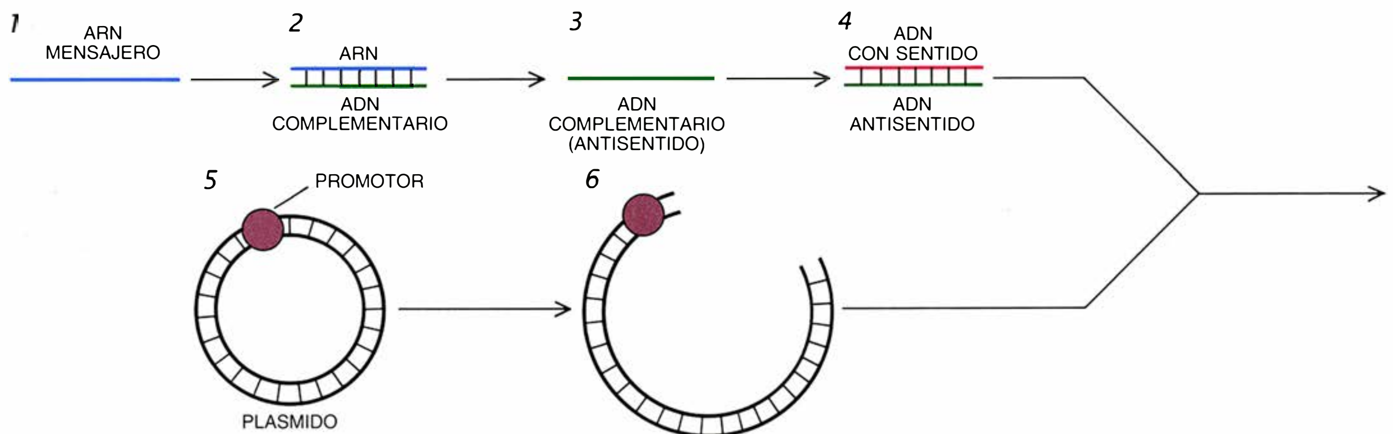
2. ESPECIFICIDAD DEL APAREAMIENTO DE BASES, clave de la inhibición génica por parte de los ARN antisentido. En la secuencia de ADN bicatenario de un gen se establecen enlaces débiles entre parejas opuestas de adeninas (*A*) y timinas (*T*) y de citosinas (*C*) y guaninas (*G*). Las cadenas de ADN con sentido y antisentido son complementarias y se emparejan perfectamente. Durante la transcripción de ADN en ARN, la cadena de ADN antisentido actúa de molde para el ensamblaje de una molécula de ARN mensajero complementaria (con sentido) donde *U*, de uracilo, sustituye a *T*. El ARN mensajero monocatenario se traduce en proteína en los ribosomas, unos orgánulos celulares. El ARN mensajero es el único producto de la transcripción de la mayoría de los genes. Sin embargo, algunos genes son regulados por la transcripción adicional de un ARN antisentido a partir de la cadena con sentido de ADN. Si se fabrica un ARN antisentido, éste puede hibridarse con el ARN mensajero. Son varios los factores que podrían impedir la traducción de la proteína: los dúplices de ARN podrían ser rechazados por los ribosomas, ser degradados por enzimas y no abandonar el núcleo; podría quizá modificarse químicamente las bases *A* y convertirse en inosinas, irreconocibles por el código genético.

cebo de ARN. Los inhibidores constituían los productos antisentido de las cadenas de ADN con sentido.

De la misma manera que las cadenas de ADN con sentido y antisentido son complementarias, también lo son las moléculas de cebadores de ARN con sentido y las moléculas inhibidoras antisentido. En consecuencia, los ARN con sentido y antisentido pueden hibridar entre ellos. En este estado bicatenario, el cebador de ARN no puede iniciar la replicación del ADN, ya que no puede emparejarse con el origen del plásmido.

La función del ARN antisentido va más allá de la regulación de la replicación del ADN; abarca también la regulación de la transcripción. En 1983, Nancy E. Kleckner, de la Universidad de Harvard, dirigió una serie de elegantes experimentos que describían la manera en que el ARN antisentido controlaba, en bacterias, la síntesis de la enzima transposasa. Durante la transcripción, a partir del gen de la transposasa, se sintetiza ARN mensajero que dirige la síntesis de la enzima. Cuando la bacteria transcribe también ARN antisentido a partir de la cadena con sentido del gen de la transposasa, el ARN antisentido se une específicamente con el ARN mensajero con sentido, e impide que el ribosoma traduzca la información cifrada en proteína.

Según parece, la regulación o inhibición de la actividad génica con ARN antisentido es un proceso universal en virus y bacterias. Dicho mecanismo controla muchas etapas del metabolismo celular. Algunos resultados sugieren que el ARN antisentido podría desempeñar también un papel “in vivo” en células más com-



3. VECTORES DE EXPRESION para fabricar ARN antisentido. Una molécula de ARN mensajero (*1*) sirve de molde para la síntesis de una cadena complementaria de ADN antisentido (*2*). Esta (*3*) puede servir de molde para sintetizar la cadena de ADN con sentido y crear un ADN bicatenario (*4*). Un plásmido (*5*) puede cortarse con retrictasas cerca de una región promotora (*6*). El plásmido se empalma con el ADN bicatenario y se ob-

plejas, aunque no se ha podido demostrar todavía.

En 1983, el trabajo pionero de Tomizawa nos sugirió a mí y a Jonathan G. Izant, ahora en la Universidad de Yale, la idea de dirigir ARN antisentido contra cualquier gen clonado, como forma de inhibir quizá la traducción de su ARN mensajero. Pensábamos que este tipo de aproximación nos permitiría inactivar genes específicos, de forma similar a como actúan las mutaciones, pero con una selectividad mayor. Una de las primeras cuestiones que nos planteamos era cómo fabricar el ARN antisentido. Decidimos utilizar las técnicas de recombinación de ADN para sintetizar vectores de expresión, unos elementos genéticos artificiales que fabricarían ARN antisentido una vez introducidos en las células.

Elegimos el gen de la enzima quinasa de la timidina (TK) del virus herpes simplex (HSV). Esta enzima convierte la timidina, una molécula precursora de la base *T* del ADN, en una forma que puede incorporarse a las cadenas de ADN naciente. Decidimos trabajar con células de una línea celular de ratón estándar, con un gen TK mutado, incapaz por tanto de incorporar timidina en el ADN replicativo. Si se inyectaban vectores de expresión con el gen TK-HSV en las células de ratón, éstas comenzaban a incorporar timidina normalmente.

Para construir vectores de expresión para ARN antisentido de la TK, acudimos al propio gen clonado de la TK del HSV. Con las restrictasas, enzimas que cortan al ADN por secuencias específicas de bases, escindimos el gen TK-HSV de los vectores de expresión bicatenarios y lo volvimos a reinsertar de forma aleatoria. De esta manera, la mitad de los genes TK volverían a su orientación original y la otra mitad seguirían la orientación inversa. En este último caso, la secuencia con sentido de la TK se insertaría en la cadena que de partida contenía la secuencia TK antisentido, y viceversa. La transcripción de estos vectores de expresión, pensábamos, produciría ARN TK antisentido en vez de ARN mensajero para la TK.

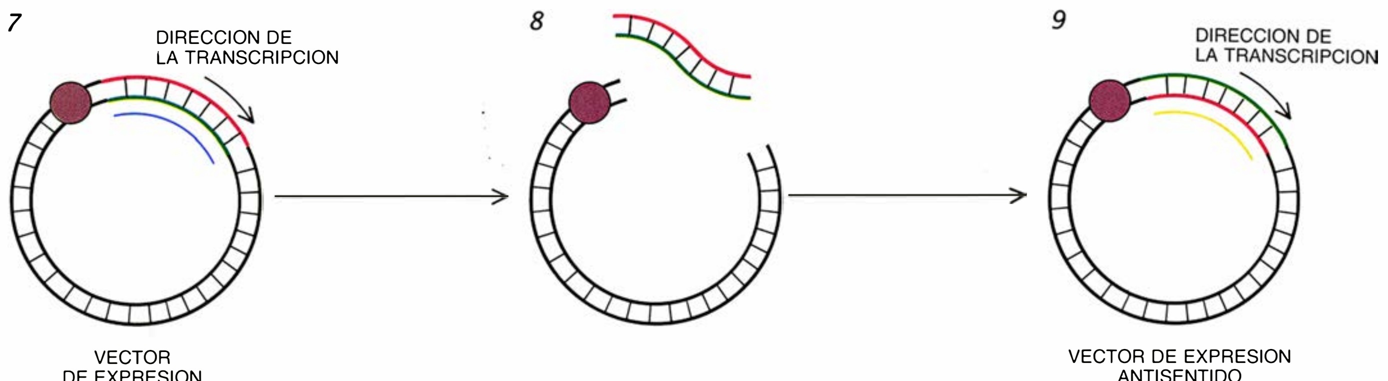
Cuando inyectamos estos vectores de expresión antisentido en las células que habían recibido de antemano los vectores TK-HSV, disminuía significativamente la capacidad de las células para incorporar timidina. Como sospechábamos, la presencia del vector de expresión antisentido estaba inhibiendo la actividad del vector de expresión con sentido. Demostramos, asimismo, que el ARN antisentido de la TK de pollo inhibía también la actividad de los genes TK de dicha especie. Sin embargo, el ARN antisentido de la TK de pollo era incapaz de inhibir genes TK de un virus, y viceversa: debíase ello a que los genes TK de pollo y de virus son distintos y, por tanto, sus productos de ARN no pueden hibridarse entre sí. Tales resultados demostraban que la inhibición antisentido podía ser muy específica.

Con estos experimentos demostramos que ARN antisentido específicos podían inhibir la función de genes diana clonados. Trabajando con bacterias y vectores de ARN antisentido, Masayori Inouye y sus colegas, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, y Sidney Pestka y sus colegas, del Instituto Roche de Biología Molecular, obtuvieron resultados similares.

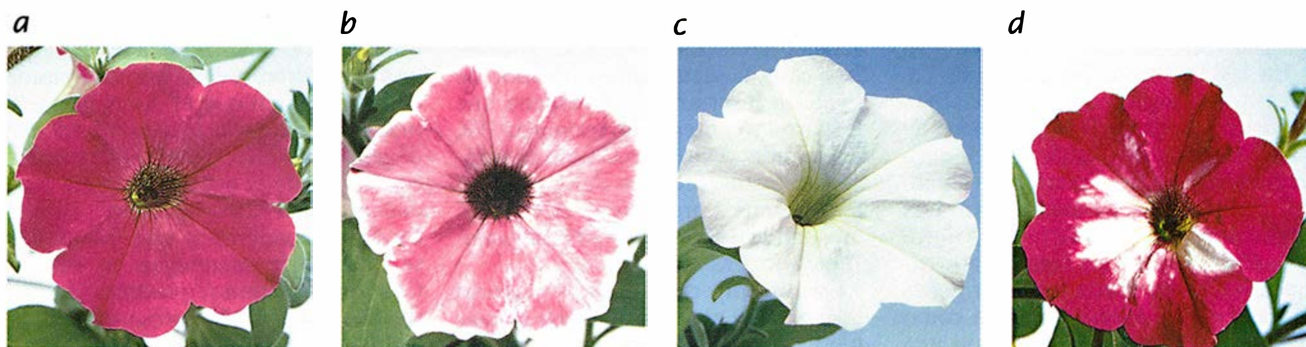
El ARN antisentido podía, pues, afectar a los genes diana clonados e insertados en las células; sin embargo, para que la tecnología basada en las moléculas antisentido demostrase su utilidad en el análisis de la función génica en vertebrados, necesitábamos probar también que el ARN antisentido podía inactivar un gen celular endógeno. Por ello, decidimos trabajar con el gen de la actina, proteína fundamental del "citoesqueleto" estructural que coadyuva a que las células se muevan y mantengan su forma. Cuando inyectamos vectores de expresión para ARN antisentido de la actina en las células, éstas producían citoesqueletos defectuosos y aparecían como más aplanadas. De nuevo, el ARN antisentido inactivaba a su gen diana o efector.

Por ser la actina una proteína esencial, las células que no la expresan mueren. Este problema puede soslayarse con promotores inducibles. Llámase promotor la parte del gen que controla la iniciación de la transcripción del producto génico. El promotor inducible inicia la transcripción del producto génico. El promotor inducible incoa la transcripción sólo en presencia de cierto estímulo inductor. Se conocen promotores inducibles por iones específicos, por temperaturas altas ("choque térmico") y por varias hormonas. Colocando un promotor inducible en un vector de expresión antisentido, el experimentador puede inducir o detener la producción de un ARN antisentido (y del producto génico afectado por éste) en cualquier momento y en cualquier célula, añadiendo o eliminando el inductor.

Mis colegas y yo hemos insertado promotores inducibles que responden a hormonas esteroides en vectores de expresión para ARN antisentido de la TK. Hemos demostrado que, en condiciones en las cuales las células necesitan genes TK activos para crecer, los esteroides inhiben el crecimiento



tiene un vector de expresión (*7*). La eficacia de este vector de expresión se comprueba en las células: cuando el promotor inicie la transcripción, el vector de expresión fabricará copias del ARN mensajero original (*azul*). Si el ADN insertado se escinde del vector de expresión, con restrictasas (*8*), puede reinsertarse en el anillo con la orientación opuesta (*9*). Durante la transcripción, este vector de expresión sintetizará ARN antisentido (*amarillo*).



4. GENES RESPONSABLES DE LA PIGMENTACION en petunias, cuya expresión se inhibe con moléculas antisentido. Una flor normal (*a*) presenta coloración sólida. Las otras flores (*b-d*) contienen vectores de expresión antisentido que bloquean la producción enzimática del pigmento rojo.

de las células que contienen estos vectores de expresión. Se trata de células que, presumiblemente, carecen de TK y no pueden sintetizar ADN. Susan Lindquist, de la Universidad de Chicago, ha obtenido resultados similares con vectores de expresión antisentido controlados por promotores inducibles por choque térmico.

Es posible modificar los vectores de expresión antisentido de tal suerte que el ARN antisentido que resulte tenga propiedades funcionales específicas. Thomas R. Cech, de la Universidad de Colorado en Boulder, ha demostrado que ciertas secuencias de ARN naturales pueden hibridarse con ARN dianas y cortarlos [véase "Función enzimática del ARN" por Thomas R. Cech, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA; enero de 1987]. Estas secuencias de ARN, o ribozimas, seccionan en la diana donde hay un triplete de bases nucleotídicas específico: *G–U–C*. Estadísticamente es probable que, en la mayoría de los ARN mensajeros, aparezca, por azar, al menos un triplete *G–U–C*.

Una vez determinada la situación del triplete en un ARN mensajero específico, los investigadores pueden insertar ADN para una ribozima en la posición correspondiente del vector de expresión antisentido. De esta manera, el vector producirá ARN antisentido con una ribozima. Cuando este ARN antisentido con ribozima hibride con su ARN mensajero diana, cortará la molécula mensajero. Este proceso ha sido demostrado en el tubo de ensayo; parece que tiene lugar también en algunas plantas infectadas con virus que producen ARN afines a las ribozimas. Queda por ver si este enfoque puede aplicarse de manera fructífera a las investigaciones sobre la función génica.

Los métodos basados en los ARN antisentido para inhibir la actividad génica no son necesariamente dependientes de los vectores de expresión. En el laboratorio se pueden sintetizar cadenas de ARN antisentido que luego se inyectan directamente en las células. En 1985, Douglas A. Melton, de la Universidad de Harvard, y Richard M. Harland, en mi laboratorio, demostraron cada uno por su cuenta que el ARN antisentido inyectado en ovocitos de ranas inhibía la traducción del correspondiente ARN con sentido, previamente inyectado. La inyección de ARN antisentido para la actina inhibe también la formación del citoesqueleto, lo mismo que ocurría con la inyección de los vectores de expresión antisentido.

El proceso de producción de grandes cantidades de ARN antisentido para su posterior aplicación experimental se ha simplificado de manera extraordinaria gracias a una ingeniosa técnica diseñada en 1985 por Barbara J. Wold y Stuart K. Kim, del Instituto de Tecnología de California. La técnica se basa en la multiplicación ("amplificación") ocasional de genes en células de cultivo. Wold y Kim ligaron un vector de expresión antisentido a un gen para una enzima esencial, e introdujeron el vector en células. Con un inhibidor de la enzima, seleccionaron las células que, tras varias generaciones, habían multiplicado el gen de la enzima y el vector de expresión. Esas células fabricaban grandes cantidades de ARN antisentido.

Los ARN antisentido no son las únicas moléculas antisentido capaces de bloquear a los ARN mensajeros e impedir la traducción de las proteínas. Fragmentos de ADN complementario pueden también hibridarse con los ARN mensajeros. En el laboratorio pueden fabricarse oligonucleótidos antisentido, cadenas de ADN de sólo 15 a 25 bases de longitud, para su introducción posterior en las células, donde tendrán efectos inhibidores, como los de los ARN antisentido. La idea inicial se debe a Paul C. Zamecnik, de la Fundación Worcester de Biología Experimental, en Massachusetts; utilizó oligonucleótidos de ADN antisentido para impedir que virus de sarcoma de Rous (RSV) transformasen, en cancerosas, células de pollo en cultivo. Algunas células parecían absorber suficiente cantidad de oligonucleótidos antisentido del medio de cultivo para que éstos se unieran a los ARN mensajeros de genes víricos.

La especificidad de un oligonucleótido antisentido depende de su longitud. Cuanto más largo, tanto mayor será la probabilidad de que se una sólo a un ADN o ARN diana. La especificidad es esencial, pues resultaría desastroso que un oligonucleótido inhibiese un gen equivocado. Pensemos, en efecto, en los cromosomas de una célula humana: hay tres mil millones de pares de bases de nucleótidos. Si las cuatro bases están presentes aproximadamente en igual proporción, y la distribución de las mismas es aleatoria, no se repetirá ninguna secuencia de 12 bases por regla general.

La química funcional de los oligonucleótidos puede ser manipulada a placer en el laboratorio. Paul O. P. Ts'o y Paul S. Miller, de la Universidad Johns Hopkins, son pioneros en ese tipo de procedimientos. Fabricaron oligonucleótidos con un "esqueleto" azúcar-fosfato sin carga; tales oligonucleótidos pueden entrar en una célula a través de su membrana externa con mayor facilidad que cualquier oligonucleótido normal. También se han sintetizado oligonucleótidos fosforoazufrados, en los que átomos de azufre sustituyen a átomos de oxígeno en el esqueleto azúcar-fosfato. Estas moléculas son menos vulnerables a las nucleasas (enzimas celulares que degradan ADN y ARN); pueden, por tanto, permanecer en el interior de las células a concentraciones altas y efectivas durante períodos más largos.

Peter B. Dervan, del Instituto de Tecnología de California, ha continuado desarrollando esa estrategia.

Ha unido un grupo químico reactivo, el ácido etilenodiaminotetraacético ligado a hierro (EDTA-Fe), a un oligonucleótido antisentido. Si este oligonucleótido hibridase con un ARN mensajero, el grupo reactivo inactivaría el ARN, cortándolo por el sitio de hibridación.

Claude Hélène y sus colegas, del Museo Nacional de Historia Natural de París, han utilizado una acridina asociada a un oligonucleótido; la acridina es una molécula planar que puede insertarse *per se* entre los pares de bases de una doble hélice de ADN. Hélène ha encontrado que la presencia de acridina en el oligonucleótido incrementa la energía con que la molécula antisentido se une al ARN mensajero diana e incrementa también la tasa de absorción del oligonucleótido por parte de las células. Junto con J.-J. Toulmé ha empleado recientemente este procedimiento en cultivos celulares para matar al parásito *Trypanosoma brucei*, un microorganismo africano que produce la tripanosomiasis. Para ello dirigieron un oligonucleótido antisentido contra una secuencia encontrada en la mayoría de los ARN mensajeros de los tripanosomas, si no en todos.

El éxito de Hélène al conseguir matar los tripanosomas ilustra el extraordinario potencial terapéutico de estas moléculas. Como cabía esperar, se están concentrando grandes esfuerzos en la actualidad para desarrollar oligonucleótidos inocuos y eficaces con fines médicos. Tales agentes adquirían especial interés en el tratamiento de enfermedades víricas, ya que a veces los investigadores conocen exactamente las secuencias nucleotídicas de los virus que causan ciertas enfermedades. En cultivos de tejidos, se han utilizado oligonucleótidos antisentido que han inhibido infecciones de virus herpes, de la gripe y del virus de inmunodeficiencia humana causante del SIDA.

Quizá sería también posible enviar oligonucleótidos antisentido contra oncogenes mutados, los genes que transforman células normales en cancerosas. El principal desafío, en este caso, lo plantea la fabricación de agentes antisentido que inactiven el oncogén mutado, sin bloquear sus precursores normales, o protooncogenes, esenciales por lo común para la supervivencia celular.

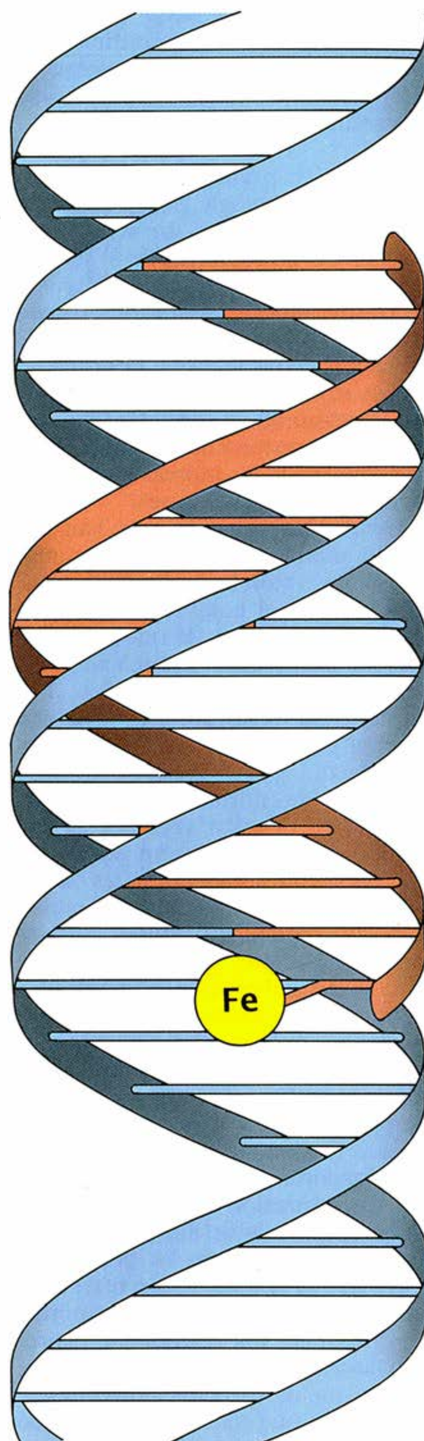
Estas aplicaciones terapéuticas de la tecnología basada en las moléculas antisentido están todavía lejanas. No obstante, estos métodos contribuyen ya al conocimiento de la función génica, en particular en las áreas del desarrollo, crecimiento y división celular. Un ejemplo notable es el trabajo realizado con el gen *src*, un gen que promueve el crecimiento celular; se encuentra, en una forma mutada, en algunos virus. El gen *src* determina una proteína que controla la actividad de otras proteínas, modificándolas químicamente. La transformación de las células de pollo infectadas con el virus del sarcoma de Rous se debe a una forma anormal del gen *src*.

En 1987, Paul E. Neiman y sus colegas, del Centro Fred Hutchinson, demostraron que los métodos basados en las moléculas antisentido impidió la transformación celular por parte de los RSV. Desarrollaron virus benignos que portaban vectores de expresión para ARN antisentido contra el gen *src* del RSV. Cuando infectaron las células con estos virus especiales, y posteriormente las expusieron al RSV, las células no se transformaron; se podía hablar en cierto modo de una "inmunización" al RSV.

En la función de *src* prosiguieron investigando David I. Shalloway, de la Universidad estatal de Pennsylvania, y Joseph B. Bolen, del NIH. Llevaron a cabo experimentos con virus del polioma, que pueden transformar células, a la manera como lo hace el RSV. En el virus del polioma el gen transformante no es el *src*, sino otro que determina una proteína: antígeno *T*. Sin embargo, si se introducen en células infectadas con polioma vectores de expresión que determinen ARN antisentido de *src*, las células pierden sus características cancerosas y revierten a su forma normal. Este efecto sugiere que el virus del polioma transforma las células mediante la activación del producto del gen *src* celular. Se deduce, por tanto, que el *src* puede llegar a ser un oncogén tanto directamente (mediante una mutación) como indirectamente (tras su unión al antígeno *T* del polioma).

Otros genes que regulan el crecimiento y el desarrollo han sido también estudiados con el mismo tipo de técnicas. En 1988, Helmut Ponta, Peter Herrlich y sus colegas, de la Universidad de Karlsruhe, probaron las interacciones de tres proteínas oncogénicas: el producto del gen *fos* (que coadyuva en la transcripción de determinados genes nucleares), el producto del gen *ras* (que transmite señales químicas a la célula a través de la membrana externa) y el producto del gen *sis* (una molécula receptora unida a membrana que afecta al crecimiento). Los tres productos génicos pueden, cada uno por su cuenta, transformar las células. El ARN antisentido contra el gen *fos* bloquea los efectos malignos no sólo de *fos*, sino también de los genes *sis* y *ras* anormales; cabe, pues, que *fos* medie en la actividad de estos genes.

El ciclo de crecimiento y reproducción celular, como se sospecha desde hace tiempo, está determinado por una proteína específica que gradualmente se acumula durante el creci-



5. TRIPLE HELICE DE ADN, que resulta tras la unión de una tercera cadena de ADN con una región diana específica de un ADN bicatenario normal. En esta configuración tricatenaria, el gen incluido en el dúplex podría quedar sin transcribirse. Si una molécula que contiene hierro (Fe) se une químicamente al final de la tercera cadena de ADN, cortará el ADN bicatenario.

miento celular y se destruye rápidamente durante la división celular. Dicha proteína, llamada ciclina, fue identificada en 1983 por Joan V. Ruderman, de la Facultad de Medicina de Harvard, y Tim Hunt, de la Universidad de Cambridge. En 1989, Hunt y sus colegas demostraron que oligonucleótidos de ADN antisentido dirigidos contra el ARN mensajero de la ciclina detenían el crecimiento y la división celular, lo que sugería la intervención de la ciclina en el ciclo de crecimiento y reproducción.

Una de las principales aplicaciones de la tecnología "antisentido" es la obtención dirigida de mutaciones de interés. Herbert Jäckle y sus colegas, de la Universidad de Munich, utilizaron moléculas antisentido para mimetizar mutaciones en embriones de la mosca de la fruta *Drosophila*. Inactivaron genes específicos con ARN antisentido y consiguieron moscas cuyas características eran las mismas que las de las moscas que tenían mutaciones en estos genes.

Fenocopias como ésas se han obtenido también en organismos más complejos, ratón incluido. "Shiverer" (tiritones) es el nombre que se da a un tipo de mutantes de ratón que tienen una proteína del sistema nervioso defectuosa, la mielina básica. Por causa de ese trastorno, la mielina que recubre y aísla las fibras nerviosas es imperfecta, y los ratones tiritones tiemblan de forma incontrolable. Cuando se insertan vectores de expresión antisentido contra la mielina básica en embriones normales de ratón, los ratones resultantes tiemblan como los mutantes tiritones. Los ratones, por tanto, pueden servir de modelo para el estudio, con métodos basados en las moléculas antisentido, de algunas enfermedades humanas.

Las técnicas antisentido no se limitan a realizar fenocopias de mutaciones que ya existen. Se crean formas totalmente nuevas con fines investigadores. Se han inyectado vectores de expresión antisentido en petunias, para inhibir una enzima que sintetiza pigmento en las flores. Las flores que se obtienen presentan unos patrones de pigmentación insólitos. En el tomate, los vectores de expresión antisentido pueden inhibir una enzima que destruye las duras y fibrosas paredes que rodean las células de la planta. Los tomates tratados maduran con mayor lentitud que los no tratados, lo que sugiere la posibilidad de conseguir formas que podrán transportarse más fácilmente a grandes distancias, sin estropearse ni chafarse. También se ha utilizado ARN antisentido contra virus de plantas, para producir variedades de tabaco resistentes a enfermedades.

La técnica basada en los antisentidos habrá de perfeccionarse. Son muchas e importantes las cuestiones que quedan todavía por resolver. Por ejemplo, deberíamos poder modificar químicamente los oligonucleótidos antisentido, de suerte que pudiesen introducirse en las células con mayor eficacia, se trabasen mejor con sus dianas o las modificasen. Además, ciertas partes del ARN mensajero podrían ser más susceptibles que otras a la inhibición por el ARN antisentido. Cuando el mecanismo de esta mayor sensibilidad se domine, habrá llegado el momento de diseñar moléculas de ARN antisentido más eficaces. Habrá que idear también métodos para asegurar que los niveles de oligonucleótidos de ADN y ARN antisentido en el interior de las células se mantengan suficientemente elevados. Esto podría conseguirse ligando un vector de expresión antisentido a una región promotora muy activa, o modificando químicamente el oligonucleótido antisentido, de suerte que sea menos vulnerable a la degradación por nucleasas.

También es necesario profundizar en el conocimiento de los mecanismos precisos por los cuales el ARN antisentido inhibe la producción de proteínas. Los resultados sugieren que el ARN antisentido interviene en el núcleo celular y en el citoplasma, y podría detener la traducción de las proteínas mediante algún otro mecanismo adicional a la mera hibridación con el ARN mensajero. El ARN antisentido podría actuar tempranamente en el núcleo, impidiendo la maduración y modificación del mensajero. Las observaciones realizadas por Wold y Kim sugieren que el ARN antisentido obstruye la exportación de las moléculas de mensajeros desde el núcleo hasta los ribosomas del citoplasma. Parece también que, al menos en algunas células, los dúplices de ARN son unas dianas sensibles a enzimas especialmente potentes. Experimentos recientes realizados con ARN antisentido en embriones de ratón han demostrado que nucleasas celulares seccionan los ARN mensajeros en los puntos de unión con los ARN antisentido.

Brenda Bass realizó una sorprendente observación en mi laboratorio. Descubrió que, cuando inyectaba heterodúplices formados por ARN mensajero y antisentido, la actividad celular separaba las dos cadenas del dúplex. Posteriores investigaciones revelaron que las adeninas de los pares *A–U* habían sido modificadas por la célula, convirtiéndolas en inosinas (*I*), otro tipo de base nucleotídica. Los pares *I–U* son menos estables, lo que origina la separación de las cadenas del dúplex. Además, la sustitución de adenina por inosina en el ARN mensajero cambia la información contenida en el mensajero, incapacitándolo para sintetizar su producto proteico original. Esta substitución podría intensificar los efectos inhibidores del ARN antisentido en algunos tipos celulares.

Marc W. Kirschner y David Kimelman, de la Universidad de California en San Francisco, han obtenido pruebas de la existencia de estas conversiones de *A* en *I*. Observaron, no hace mucho, que un ARN mensajero natural para un factor de crecimiento y diferenciación estaba asociado en embriones con un antisentido, y que, en este ARN, las *A* se convertían en *I*. Martin Billeter, de la Universidad de Zurich, y sus colegas, han descubierto conversiones de *A* en *I* similares en virus que infectan seres humanos y que probablemente mantienen una forma de ARN bicatenario durante su ciclo de vida.

Recientemente se han desarrollado nuevas estrategias basadas en la exquisita especificidad que ofrecen las secuencias de bases, para inactivar genes específicos. Hay que remontarse a las importantes observaciones realizadas, hace tres décadas, por Alexander Rich, David R. Davies y Gary Felsenfeld, del NIH, y ampliadas por Jacques R. Fresco, de la Universidad de Princeton. Demostraron que el ADN formaba a veces hélices triples, en la que una cadena extra se asocia específicamente con ciertas secuencias de las cadenas emparejadas. Bases de la tercera cadena reconocen y se unen a una secuencia específica de bases del dúplex.

En 1987, Dervan aprovechó este fenómeno para crear una hélice triple cuya tercera cadena era un oligonucleótido de ADN dirigido contra una secuencia del ADN dúplex normal. La unión de una tercera cadena podría bloquear la expresión del gen en el dúplex original, por la verosímil razón de que bloquea la unión de las proteínas controladas o de enzimas esenciales para la transcripción. Dervan equipó también al oligonucleótido con el agente cizalla EDTA-Fe. El oligonucleótido modificado corta el ADN dúplex por el sitio donde se forma la triple hélice. Hasta ahora no se conoce el mecanismo detallado en virtud del cual una tercera cadena se une a un ADN dúplex, ni el código mediante el cual una tercera base "reconoce" a un par específico de bases. Cabría, sin embargo, diseñar oligo-

nucleótidos que se uniesen de forma predecible con un ADN bicatenario diana específico, como los genes víricos por ejemplo, y lo destruyese. Es éste en la actualidad un campo de investigación efervescente.

Otra técnica muy prometedora nos la ofrece la recombinación homóloga dirigida. Se basa en la utilización de ADN clonado que contiene una copia mutada de un gen diana. Este ADN se introduce en las células, allí encuentra a su diana, en el núcleo celular, y la reemplaza, en su contexto cromosómico normal. Leland H. Hartwell y sus colegas, de la Universidad de Washington, han demostrado que los genes clonados podían manipularse para que se expresaran sin tasa en el interior de las células. Esta situación provoca un fenotipo que ayuda a hacerse una idea sobre la función de tales genes. Los genes clonados pueden ser programados para que se expresen de forma anormal; mis colegas y yo hemos demostrado que la expresión de un gen que determina el músculo, *MyoD*, en una célula de tejido adiposo la convierte en célula muscular.

El reto que supone imaginar nuevas formas de manipular la actividad de los genes celulares está estimulando el desarrollo de la tecnología de los ARN antisentido y de estas otras técnicas. No cabe duda de que, con más información, técnicas más refinadas e imaginación, surgirán nuevas formas de análisis que completen las actuales. La genética inversa está permitiendo profundizar con rapidez en el conocimiento de la función génica; con suerte, potenciará las posibilidades de la medicina para entender y tratar las enfermedades.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ANTI-SENSE RNA AS A MOLECULAR TOOL FOR GENETIC ANALYSIS. Harold Weintraub, Jonathan G. Izant y Richard M. Harland en *Trends in Genetics*, vol. 1, n.° 1, págs. 23-25; enero de 1985.

THE ROLE OF ANTISENSE RNA IN GENE REGULATION. Pamela J. Green, Ophry Pines y Masayori Inouye en *Annual Review of Biochemistry*, vol. 55, págs. 569-597; 1986.

ANTIMESSENGER OLIGODEOXYRIBONUCLEIOTIDES: AN ALTERNATIVE TO ANTISENSE RNA FOR ARTIFICIAL REGULATION OF GENE EXPRESSION — A REVIEW. J.-J. Toulmé y C. Hélène en *Gene*, vol. 72, n.° 1, págs. 51-58; 29 de diciembre de 1988.

MODULATION OF EUKARYOTIC GENE EXPRESSION BY COMPLEMENTARY RNA OR DNA SEQUENCES. Alexander R. van der Krol, Joseph N. M. Mol y Antoine R. Stuitje en *BioTechniques*, vol. 6, n.° 10, págs. 958-975; 1988.

Ciencia y sociedad

Fósiles de las calizas litográficas del Montsec

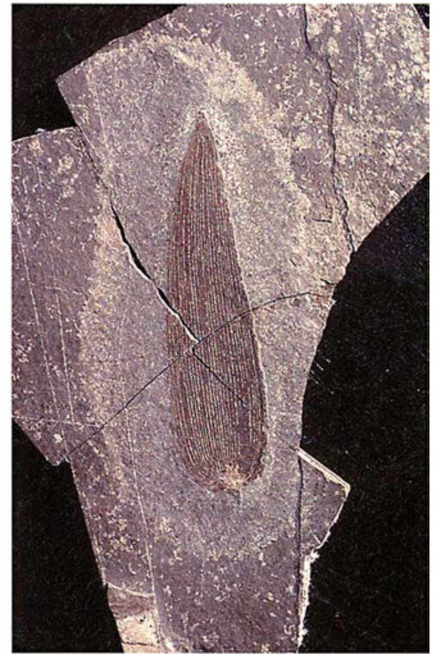
Desde 1979, la sección de geología del Instituto de Estudios Ilerdenses (IEI) de la diputación de Lérida ha llevado a término una serie de prospecciones paleontológicas en los yacimientos de "La Pedrera de Meià" y "La Cabrua", en la sierra del Montsec.

Estos, constituidos por calizas litográficas, han proporcionado una rica representación de la flora y fauna fósil de ambiente continental procedente del Cretácico inferior (Berriasiense superior-Valanginense inferior: 135 millones de años atrás).

La importancia paleontológica del primer depósito, "La Pedrera de Meià", fue puesta de manifiesto a principios del presente siglo por Luis Mariano Vidal, ingeniero de minas, gracias a la instalación "in situ" de una pequeña industria dedicada a la extracción de la fina piedra utilizada antaño en las artes gráficas, lo que permitió el hallazgo de fósiles magníficamente conservados en su mayoría. En efecto, al exfoliar las lajas calizas aparecieron numerosos vestigios que reclamaron la atención de los científicos de la época.





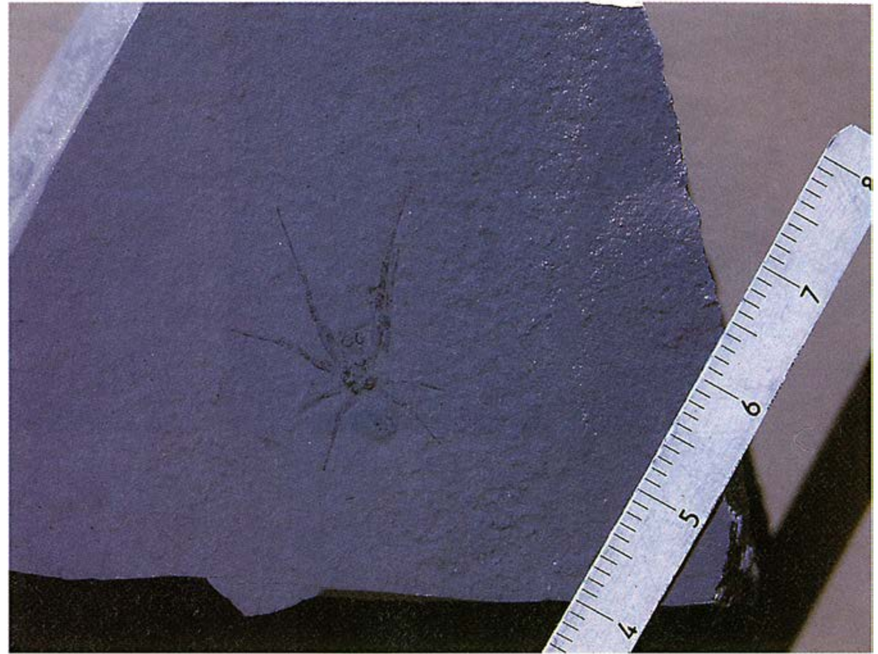






1. FLORA FOSIL de las calizas litográficas del Montsec (Lérida). De izquierda a derecha, y de arriba abajo: Montsechia vidali, *planta abundante cuya posición taxonómica resulta desconocida, de 5 centímetros de longitud; hoja peciolada y lobulada de* Ginkyo sp., *de unos 6 centímetros de longitud; foliolo tipo* Zamites, *posiblemente perteneciente a una Bennettital y de unos 4 centímetros de longitud; ramita aislada de* Pagiophyllum sp, *conífera frecuente en los yacimientos, de unos 3 centímetros de longitud, y* Ranunculus ferreri, *vegetal relacionado con las ranunculáceas y, por tanto, posible angiosperma, única conocida en los yacimientos del Montsec hasta el momento.*







2. *ARTROPODOS del Montsec.* Arriba, a la izquierda, *el crustáceo decápodo* Pseudastacus llopisi, *en donde puede observarse el contorno de las quelas y antenas. La preservación de estos animales no suele ser satisfactoria. (Mide unos 9 cm de longitud.)* Arriba, a la derecha: *ejemplar de araña en estudio. La escasez de estos artrópodos en el resto del mundo hace que los ejemplares del Montsec se consideren como auténticas rarezas paleontológicas.* Abajo: *ortóptero en estudio. Sus grandes dimensiones le confieren una notable espectacularidad. No abundan en los yacimientos del Montsec; mide 16 cm de longitud.*

Desde entonces, el inventario paleontológico ha ido creciendo gracias a la contribución tanto de aficionados y estudiosos como por las expediciones realizadas por la mencionada sección de geología del IEI que, en colaboración con expertos del Instituto de Paleontología de París, el Laboratorio de Paleobotánica de la Universidad Claude-Bernad de Lyon, la Universidad de Barcelona y la de Madrid, han cubierto también los aspectos estratigráficos, sedimentológicos y paleoambientales.

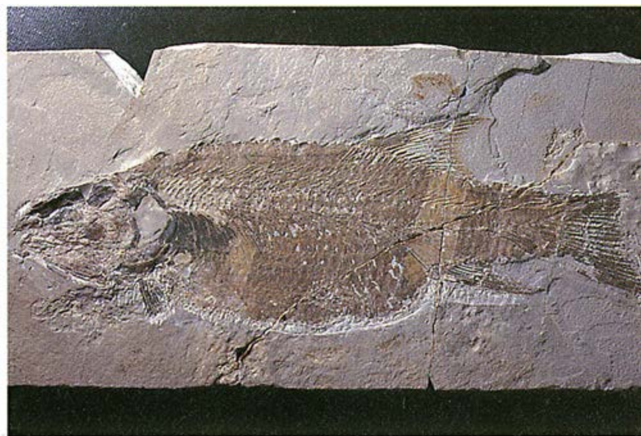
Las principales colecciones públicas sobre el material recolectado están depositadas en el Museo Municipal de Geología de Barcelona, al cual Vidal legó sus descubrimientos, y en la indicada sección de geología del IEI, en Lérida. El Museo Geológico del Seminario Conciliar de Barcelona aloja, asimismo, varias muestras.

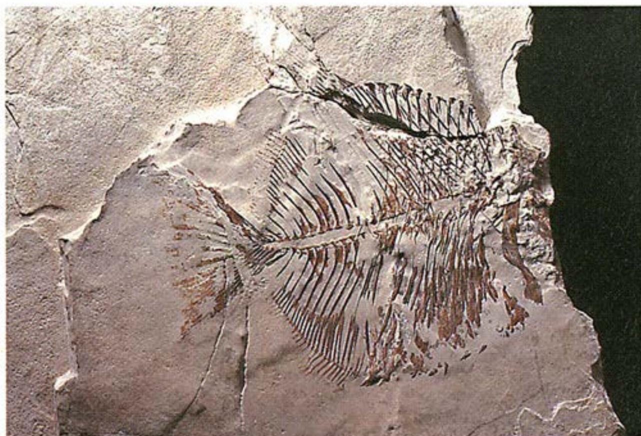
Entre la flora surgida en estos prolíficos yacimientos, los estudios de los macrofósiles ofrecen representantes de Filicales (*Weichselia*), Pteridospermales (*Pachypteris*), Ginkyoales (*Ginkyo*), Cycadales (*Pseudoctenis*), Caytoniales (*Sagenopteris*) y Bennettitales (*Zamites*); se trata de frondes fraccionadas, foliolos y hojas sueltas. Con respecto a las Espermatofitas, menudean las Coniferales, de las que se han recuperado ramitas fragmentadas, estróbilos y sus escamas aisladas. Cuentan con varios géneros: *Pagiophyllum*, *Brachyphyllum*, *Araucarites*, *Frenelopsis*, y otros. Las Angiospermas apuntan con una ranunculácea, *Ranunculus ferreri*, posiblemente la más antigua de Europa. Algunos de los restos vegetales no han podido ser identificados taxonómicamente, a pesar de la abundancia de sus fósiles. Tal es el caso de la especie *Montsechia vidali*, cuyas estructuras conservadas no permiten una determinación precisa. Por otra parte, el examen palinológico ha demostrado la presencia de numerosos géneros esporo-polínicos que refuerzan los grupos macroflorales indicados, si bien los porcentajes más elevados de estos microrrestos señalan a las Coníferas y Bennettitales-Cycadales como dominantes.

La fauna de invertebrados está compuesta por Bivalvos, Gasterópodos, Crustáceos, Arácnidos e Insectos. Los dos primeros grupos son testimoniales, habida cuenta de la rareza de sus hallazgos. Los Crustáceos se distribuyen en cuatro géneros de Ostrácodos de liso caparazón, los cuales sirvieron para establecer la edad de los depósitos, y dos géneros de Decápodos macruros, figurando los Natantia (Oplophoridae) y Reptantia (Nephropidae).

Los Arácnidos, de reciente descubrimiento, se revelan de gran importancia por la notable escasez planetaria de sus hallazgos en lo relativo al orden Aranea (Arañas, dos géneros







3. PECES fósiles del Montsec. Arriba, *dos representantes del estadio holósteo más frecuentes en las canteras. Algunos de ellos preservan sus recias escamas rómbicas mientras que otros carecen de ellas:* Propterus sp *(*izquierda*),* Caturus sp *(*derecha*).* Coelodus sp *(*abajo*).*

descritos). Las calizas litográficas del Montsec han contribuido con tres nuevos géneros emplazados en las actuales superfamilias Dinopoidea y Aranoidea. Si pasamos a los insectos, abundan bastante en estos yacimientos, y se conocen ya Efemerópteros, Odonatos, Blátidos, Isópteros, Hemípteros, Coleópteros, Dípteros (larvas) e Himenópteros. Esperan su estudio ejemplares de Ortópteros, Neurópteros, imagos de Dípteros y otros.

El grado extraordinario de conservación de muchos de estos minúsculos seres se hace patente al permitir observar bajo binocular las delicadas estructuras de sus miembros, sedas, uñas, dentículos, nerviaciones alares y demás.

En el capítulo de los vertebrados, descuellan por su número y variedad los housepisciformes, habitantes autóctonos de la antigua cuenca. De entre ellos, dos grupos están representados de modo muy exiguo en estos depósitos: los Seláceos, con los géneros *Hybodus* y *cf.Lonchidion*, de deficiente fosilización debido a su esqueleto cartilaginoso, y los Celacántidos, con dos ejemplares de "*Holophagus*", que muestran también una deficiente conservación.

Los Holósteos cuentan con seis familias –Pycnodontidae (Wenz, 1989), Semionotidae, Caturidae, Amiidae, Ophiopsidae y Macrosemiidae–, y diez géneros reconocidos (*Coelodus*, *Notagogus*, *Caturus*, *Propterus*, entre los más frecuentes). En comparación, el número de individuos pertenecientes a los Teleósteos es notablemente superior, aunque sólo son cinco los géneros –determinados y en estudio–, repartidos entre las familias Pleuropholidae, "Leptolepidae", ?Elopidae y Chanidae. De los "Leptolepidae", *Ascalabos voithi* resulta ser la especie más abundante del yacimiento, siendo los ejemplares de esta familia, junto con los de Pleuropholidae y Chanidae, peces de pequeño tamaño (3-6 centímetros).

Tres son, entre los anfibios, los géneros de Anuros descubiertos, aunque uno de ellos ofrece grandes dudas de identificación debido a su mala fosilización. *Eodiscoglossus santojae* es la especie más frecuente dentro de la parquedad de sus hallazgos y exhibe detalles evolutivos próximos a los Discoglossidae.

En el apartado de los reptiles, su registro fósil resulta muy pobre, pues existen únicamente tres especímenes, de los cuales el más completo, *Montsecosuchus depereti* (Buscalioni y Sanz), es un cocodrilo de pequeñas dimensiones (53-57 centímetros). Los dos ejemplares restantes, fragmentados y parciales, se incluyen en los Lacertilia.

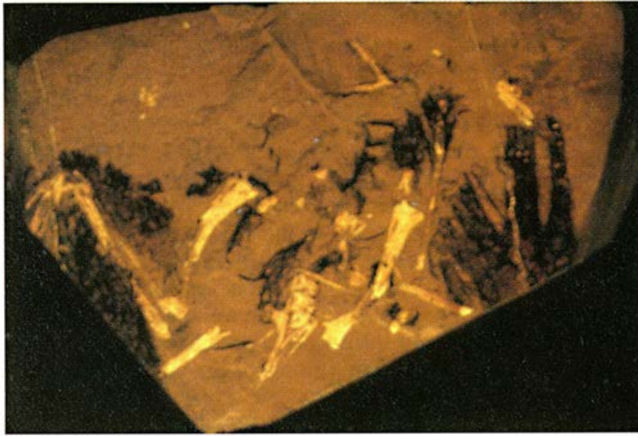
Merecen atención especial los restos de aves surgidos en estas prolíficas canteras; consisten en varias plumas aisladas y restos óseos fragmentados pertenecientes a un ave de pequeñas dimensiones. Las plumas aisladas recolectadas en los yacimientos ilerdenses suman aproximadamente una veintena, muchas de ellas en un magnífico estado de conservación. Su estudio puso de manifiesto la existencia de muy diminutos depósitos pigmentarios ubicados en los entronques de los segmentos barbulares, al igual que se observa en las plumas de cobertura de muchas aves actuales que exhiben ciertas tonalidades de color oscuro. Todos los ejemplares recuperados son de cobertura y de reducidas dimensiones, con excepción de una rémige.

En cuanto a restos óseos, en 1902, Vidal dio cuenta de la destrucción de una posible ave durante la extracción comercial de las lajas calcáreas. Ningún otro esqueleto ha salido a la luz, hasta hoy, a excepción del anunciado en 1986. Su fragmentado e incomple-





4. *LOS TELEOSTEOS son los ictiformes más abundantes en ejemplares en estos depósitos. Son de pequeño tamaño, a excepción de la especie* "Anaethalion" vidali *(derecha); el ejemplar de la izquierda está en estudio.*



5. *FOTOGRAFIA BAJO LUZ ULTRAVIOLETA de los restos fragmentarios de un ave, actualmente en estudio. La longitud de la placa caliza es de unos 8 cm.*

to estado no permite extraer apenas conclusiones, aunque conserva una fúrcula con un conspicuo hipocleideum, ambos húmeros, radios, una ulna y costilla, fragmentos carpales y metacarpales, amén de algunas vértebras y huesos muy deteriorados. Se hace evidente la presencia de plumas rémiges secundarias del ala izquierda; ciertas impresiones plumosas dibujan un posible patagio, que sería el testimonio más remoto conocido hasta el presente sobre tal estructura. La suma de los caracteres observados en el fósil indican ciertas similitudes con el esquema arqueopteriano, mientras que otros apuntan a una más avanzada dirección, sin poder pronunciarse, por la pobreza de los vestigios, en ningún sentido.

Son pocos los testimonios fósiles de aves descubiertos en terrenos comprendidos entre el Jurásico superior y el Cretácico inferior en el resto del planeta. Los depósitos más próximos en edad a los del Montsec y con más completos fósiles de estos animales están situados en España y Alemania, si bien existen más localidades que han suministrado cierto material –plumas y huesos–, siempre muy fragmentario.

En España, el yacimiento de calizas litográficas de "Las Hoyas", en la provincia de Cuenca, está aportando una copiosa flora y fauna procedente del Hauteriviense –y, por tanto, de edad muy próxima a la de los yacimientos del Montsec–, en donde destaca el descubrimiento de una pluma aislada, así como un esqueleto casi completo de una pequeña ave que conserva un hipocleideum semejante al del Montsec. Por otra parte, las canteras germanas de Solnhofen (Jurásico superior) son bien conocidas por sus extraordinarias aportaciones paleontológicas y, en particular, por los seis célebres esqueletos de *Archaeopteryx* y una pluma, los más antiguos representantes de las aves en el mundo. Las comparaciones con el material inventariado existente, habida cuenta de la precariedad y conservación de sus fósiles, no parecen mostrar vinculación aparente con el ave del Montsec. Por otra parte, se hace del todo evidente la amplia distribución mundial de la Clase ya en los primeros tiempos del Cretácico inferior.

Aparte de todo lo hasta aquí expuesto, se han obtenido también trazas fósiles de la actividad animal que coadyuvan al conocimiento de aspectos complementarios sobre la paleofauna. En este sentido, se atribuyen a los písciformes de los yacimientos numerosos excrementos fósiles exhumados; muchos de ellos contienen restos óseos indigeridos de peces, lo que da cuenta de un régimen ictiófago. Efectivamente, en un ejemplar testimonio se conservan, en su estómago, los esqueletos de dos pequeños pececillos, engullidos poco antes de la muerte del predador.

Han aparecido también huevos de Seláceos, fusiformes, que se sujetan al sustrato mediante unos filamentos, mientras que una cintilla espiral recorre la cápsula. Dicha espiral, al aplastarse ambas caras del huevo sobre el sedimento, diseña en el fósil la muesca de un trazado rómbico característico.

Aunque poco frecuentes, se han recuperado losas en donde pueden apreciarse impresiones de pasos en un recorrido paralelo. Estas icnitas pertenecen a pequeños animales, dadas su forma, dimensiones y la poca profundidad de la muesca. Podría tratarse de huellas de ciertos invertebrados pobladores de la cuenca.

Los continuados trabajos sobre los yacimientos del Montsec hacen concebir fundadas esperanzas de ulteriores descubrimientos, que permitirán

ampliar cada vez más el marco de nuestros conocimientos sobre la flora y la fauna continental en los albores del Cretácico. (A. L. R.)

Carroñeros abisales

Hace poco más de una década la mayoría de científicos creía que los fondos marinos abisales eran un desierto frío y oscuro. Hacia finales de los años setenta, sin embargo, los investigadores descubrieron que las surgencias submarinas cálidas, los humeros hidrotermales, soportan oasis de vida a miles de metros bajo la superficie del océano. Estos ecosistemas no se basan en la luz del sol para su sustento primario, sino que se apoyan en las sustancias químicas que los humeros arrojan; las sustancias químicas alimentan a bacterias, que a su vez soportan una cadena alimentaria constituida por especies únicas de bivalvos, gusanos y otros animales.

Más recientemente se han descubierto comunidades quimiosintéticas similares alrededor de los llamados rezumaderos fríos, donde petróleo y otras sustancias ricas en energía se liberan del fondo oceánico. Aunque en la actualidad se han identificado muchos humeros y rezumaderos, la mayoría de ellos se concentran en zonas bastante restringidas: por lo general las crestas centro-oceánicas o los márgenes continentales. ¿Cómo se dispersan los organismos quimiosintéticos hasta zonas tan distantes entre sí? Un hallazgo casual realizado por el submarino de investigación *Alvin* ha identificado una posible pasadera: los cadáveres de las ballenas.

El hallazgo tuvo lugar hace dos años, cuando los investigadores estaban realizando la última de una serie de inmersiones en la cuenca de Santa Catalina, a unos 35 kilómetros al sudoeste de Los Angeles. Mientras tomaban fotografías a una profundidad de 1240 metros advirtieron lo que parecía un afloramiento de caliza. Después de una inspección más atenta, la formación resultó ser el esqueleto de un rorcual azul o franco de 20 metros de longitud. "Fue sólo un hallazgo afortunado", afirma Craig R. Smith, de la Universidad de Hawai en Manoa.

Smith y otros investigadores de Hawai y de la Universidad de Washington volvieron varias veces al lugar para tomar medidas y recolectar muestras. El esqueleto está rodeado por gruesas placas de bacterias y por almejas y mejillones semejantes a los que rodean los humeros y los rezumaderos. No se ve carne, pero Smith sugiere que el esqueleto por sí solo contiene aceite, lípidos y otros materiales orgánicos en cantidad suficiente para sostener el ecosistema en la actualidad y posiblemente durante muchos años más. "Hay muchísima energía en los huesos", dice.

¿Qué edad tiene el cadáver? Una medición del carbono 14 (radiactivo) de los huesos indica que la ballena murió en algún momento posterior a la época en que las superpotencias iniciaron las pruebas a gran escala de armas nucleares en la atmósfera; esto implica que el esqueleto debe tener menos de 34 años de edad, según Smith. El tamaño de los bivalvos que crecen sobre los huesos proporciona un límite de edad inferior de por lo menos tres años.

En una carta a *Nature*, Smith y sus colegas sugieren que un cadáver de ballena típico puede sustentar un ecosistema quimiosintético durante al menos cinco años. Estiman que sólo las muertes de ballenas grises podrían crear al menos 500 hábitat abisales nuevos por año en el Pacífico Norte. Naturalmente, antes de la expansión de la caza de ballenas este número debió de ser mucho más elevado.

Explorador de la radiación cósmica de fondo

A finales del año pasado, la Administracion Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) lanzó su primer satélite dedicado al estudio de fenómenos relacionados con los orígenes del universo: el "explorador de la radiación cósmica de fondo" (COBE, siglas de *Cosmic Background Explorer*). Porta tres detectores complementarios que tomarán mediciones fundamentales de la radiación celeste. Se cree que parte de esa radiación se originó en la misma aurora del universo. Midiendo la radiación residual en longitudes de onda de un micrometro a cuatro centímetros en la totalidad del cielo, los científicos esperan resolver muchos misterios referentes al origen y evolución del universo temprano.

Los datos recogidos por COBE ayudarán, así se espera, a resolver cuestiones tales como: ¿cuáles eran las condiciones cuando se emitió la radiación residual?, ¿cómo era el cosmos cuando se formaron los primeros cuerpos luminosos?, ¿podemos ver la radiación difusa de la primera generación de estrellas?, ¿hubo una era en que las masas de polvo intergaláctico absorbieron una proporción sustancial de la primitiva luz de las estrellas?, y otras de tenor semejante.

La radiación cósmica, creada en los comienzos de la evolución del universo bajo unas condiciones diferentes de las dominantes hoy, se compone probablemente de varias partes. Cada una se habría originado en una fase distinta de la evolución del universo y habría sido resultado de procesos diversos. La componente mejor establecida es la radiación cósmica de fondo en microondas (CMB); la medición de sus propiedades constituye un activo campo de investigación. Se espera encontrar otra componente en la región infrarroja del espectro: la radiación infrarroja de fondo (CIB), cuya existencia no se ha confirmado y que es la consecuencia prevista de la formación de los primeros objetos a partir de la materia primigenia.

Por desgracia, esas reliquias radiativas son débiles y están veladas por fuentes locales, astrofísicas y terrestres, de radiación. Las longitudes de onda de las diversas componentes cósmicas pueden también solaparse, lo que convierte en un desafío la comprensión de la radiación celeste difusa. Sin embargo, los instrumentos del COBE, con su cobertura completa del cielo, alta sensibilidad en un amplio dominio de longitudes de onda y ausencia de interferencia de la atmósfera terrestre, constituirán un observatorio de alcance y sensibilidad sin precedentes. Las señales cósmicas de interés se podrán separar entre sí y de las fuentes de radiación no cósmicas mediante un análisis muy completo de los datos.

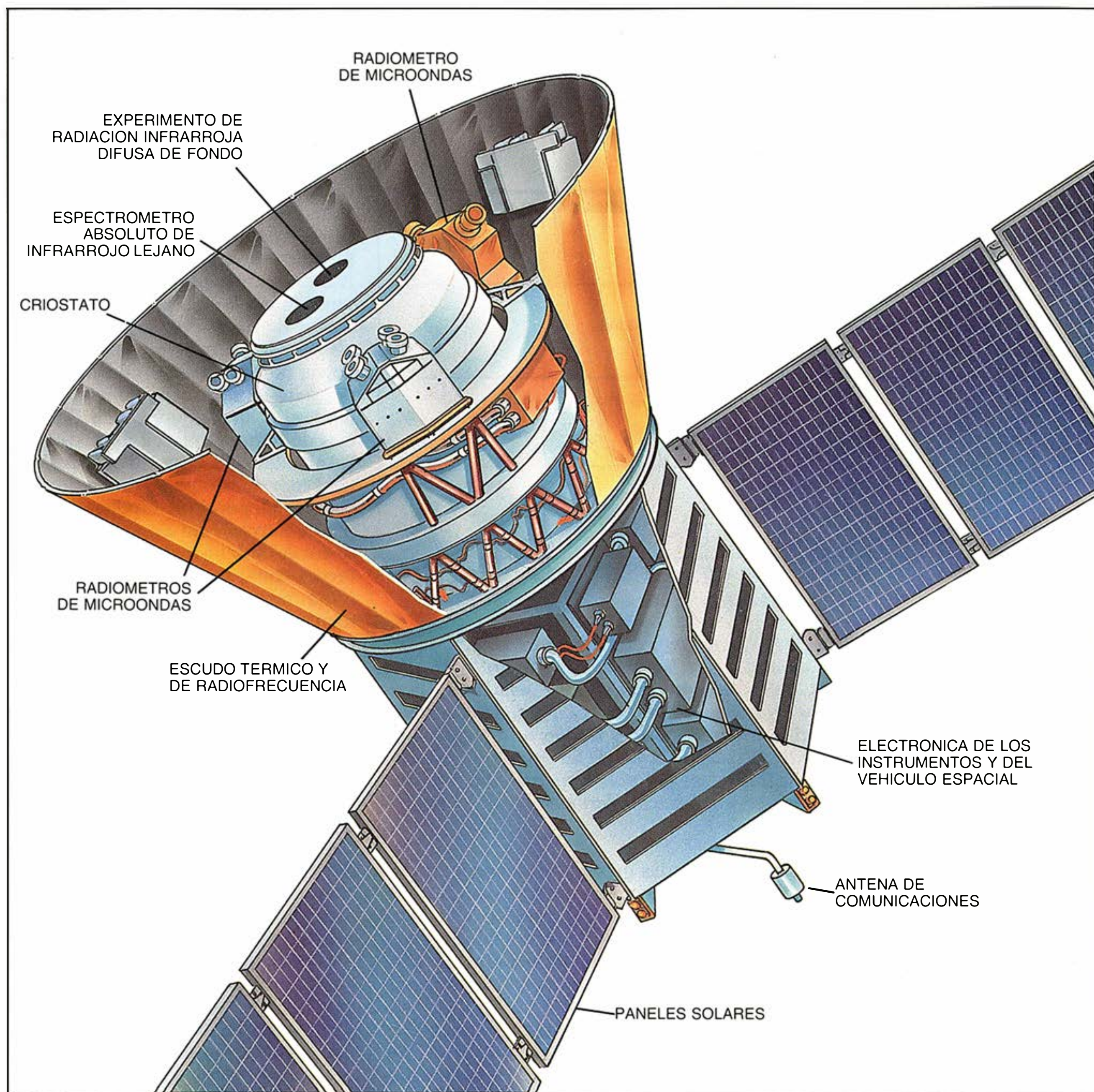
La misión COBE ha sido profundamente moldeada por los actuales conocimientos del universo. El descubrimiento de la radiación CMB ha conducido a una amplia aceptación de la teoría de la gran explosión, notable síntesis de diversas observaciones entre las que se encuentran la expansión del universo y su relación de hidrógeno a helio, así como la propia CMB. Según esta teoría, el universo se inició a partir de una primitiva bola de fuego, un estado extremadamente denso y caliente de diminuto volumen, que desde entonces se dilató hasta su tamaño actual. Al dilatarse, la materia y la radiación se enfriaron partiendo de temperaturas tan altas que el comportamiento de la primitiva materia existente en los primeros instantes del universo está mas allá de la capacidad de predicción de la física actual.

El proyecto COBE combina una cuidadosa integración de instrumentos, vehículo espacial y órbita para reducir

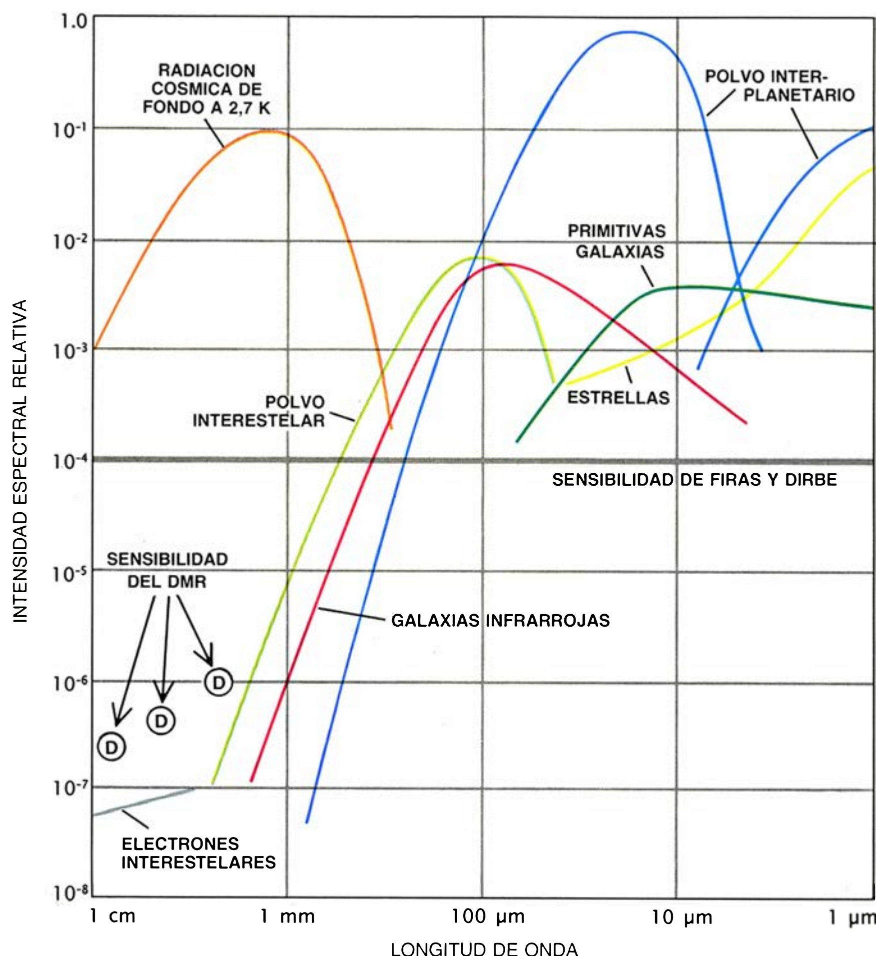
errores sistemáticos, con instrumentos que cubren un amplio dominio espectral (desde el infrarrojo próximo hasta las longitudes de onda centimétricas) y que pueden medir la radiación de fondo en todos los puntos del cielo.

La misión investigará anisotropías angulares en la CMB, medirá su espectro y rastreará y medirá la CIB. El análisis de las emisiones de las fuentes astrofísicas relativamente próximas constituye otro objetivo de la misión. Tal conocimiento es imprescindible para desentrañar el origen y evolución, no sólo de nuestro sistema solar, sino también de nuestra galaxia. Además, las radiaciones cósmicas de fondo no se pueden determinar sin esa base.

El COBE lleva tres detectores com-



*6. EXPLORADOR de la radiación cósmica de fondo (*COBE*) escudriña el cielo desde una órbita casi polar cerca del terminador día-noche de la Tierra. Una pantalla protege sus tres instrumentos de la radiación solar y de la radiación terrestre. Una provisión de helio líquido para un año, almacenado en el criostato (botella aislada mediante vacío), enfría el espectrofotómetro absoluto de infrarrojo lejano (*FIRAS*) y el experimento de radiación infrarroja difusa de fondo (*DIRBE*) para mejorar sus sensibilidades y reducir errores sistemáticos. El* FIRAS *examina 1000 regiones celestes en busca de procesos de gran energía en el universo primitivo. El* DIRBE *mide el brillo absoluto del cielo en busca de vestigios de la primitiva luz de las estrellas, fenómeno predicho pero no comprobado, que podría explicar la evolución de la estructura cósmica. Tres radiómetros diferenciales en microondas (*DMR*), situados fuera del criostato, llevan a cabo un tercer grupo de observaciones. Cada uno de ellos intenta descubrir diminutas variaciones espaciales, o anisotropías, en la intensidad de las microondas, que podrían indicar si la materia estaba distribuida de manera desigual en la época en que se originó la radiación cósmica de fondo en microondas.*



7. EL BRILLO PREVISTO para los fenómenos que observará COBE *se representa en función de la longitud de onda. Las fuentes locales de brillo variable en el cielo se indican en sus valores mínimos esperados; se señalan también las sensibilidades supuestas de los experimentos del* COBE. *La radiación cósmica en microondas de 2,7 K predomina sobre las fuentes locales a lo largo de un amplio dominio de longitudes de onda. La radiación de las primitivas galaxias debió ser casi tan intensa como las emisiones del polvo interplanetario a longitudes de onda próximas a los cinco micrometros.*

plementarios: un conjunto de radiómetros diferenciales de microondas, un interferómetro de polarización de Michelson y un fotómetro de filtro de infrarrojo. Cada instrumento mide un aspecto diferente de la radiación cósmica de fondo. Cada uno de los instrumentos ha sido proyectado de manera que minimice los errores sistemáticos y proporcione la sensibilidad necesaria para medir las radiaciones cósmicas de fondo.

Los radiómetros diferenciales de microondas (DMR) medirán la anisotropía en gran escala en la CMB con una precisión superior a una parte en 100.000, lo que representa una variación tenuísima. Los datos recabados por este instrumento se emplearán para buscar las semillas de las actuales estructuras en gran escala, la expansión anisótropa o rotación del universo, ondas gravitatorias, corrientes de materia en gran escala y cuerdas cósmicas. La teoría predice que tales cuerdas —que pueden considerarse objetos monodimensionales de gran masa— debieron formarse inmediatamente después de la gran explosión. Si lo hicieron, pudieron haber proporcionado un marco en el que se desarrollasen las macroestructuras.

Los radiómetros alcanzan su alta sensibilidad conectando y desconectando rápida y alternativamente dos antenas de bocina casi idénticas, cada una de ellas apuntando a un ángulo de 30 grados respecto al eje de rotación del vehículo. Las diferencias de potencia medidas se convierten en diferencias de temperatura en el cielo mediante una comparación con referencias proporcionadas por fuentes a bordo y medidas de la Luna. Hay tres cajas de recepción, una para cada una de las tres longitudes de onda. Las longitudes de onda específicas se escogieron para optimizar la posibilidad de distinguir entre las fuentes galácticas locales y las emisiones del polvo y la radiación cósmica de fondo en microondas.

Para proporcionar mayor sensibilidad, los componentes críticos de los dos radiómetros de longitudes de onda más cortas se enfrían pasivamente por radiación hasta unos 140 K, mientras que los radiómetros de mayores longitudes de onda operan a la temperatura de una habitación. Los radiómetros enfriados pueden detectar una diferencia de temperatura de aproximadamente 0,025 K en una medida de un segundo. La sensibilidad de los datos de cada receptor de DMR después de un año de observación será de unos 100 microkelvin por campo de visión en el cielo de siete grados. Combinando esos puntos, el DMR podrá medir diferencias de temperatura en grandes escalas angulares de hasta 10 microkelvin. (Por mor de comparación, la diferencia de temperatura dipolar causada por el movimiento de la Tierra alrededor del Sol con respecto a la CMB aparecerá como una señal de gran magnitud respecto al ruido del instrumento.)

El espectrómetro interferométrico de Michelson, o espectrofotómetro absoluto de infrarrojo lejano (FIRAS), medirá el espectro de la radición de fondo desde un centímetro hasta 100 micrometros en cada una de 1000 partes del cielo. Las desviaciones respecto al espectro de un cuerpo negro se medirán con una precisión de un 1 por 1000. Una desviación indicaría la presencia de fuentes de gran energía en el primitivo universo. La difusión de los fotones cósmicos de fondo por los electrones calientes produce una variación bien conocida en el espectro del cuerpo negro. Esta perturbación denunciaría la presencia de un gas caliente ionizado producido por la inyección de energía bastante después del desacoplamiento (período del universo en que se formaron los átomos neutros). Tal calentamiento podría haber sido producido por la formación de estrellas o galaxias. El FIRAS, como el DMR, es un instrumento diferencial. Compara la potencia espectral recibida del cielo con una fuente interna de referencia que tiene una temperatura controlable y propiedades de emisión calibradas. La alta precisión del instrumento FIRAS es atribuible a una fuente móvil de ca-

libración que puede colocarse a la entrada de la bocina de recepción. El espectro emitido por el calibrador está dentro del 0,01 por ciento del de un cuerpo negro. La temperatura del calibrador se ajusta para igualar el flujo del cielo. Cualquier diferencia espectral restante entre el cuerpo negro y el cielo podría entonces medirse con un alto grado de sensibilidad.

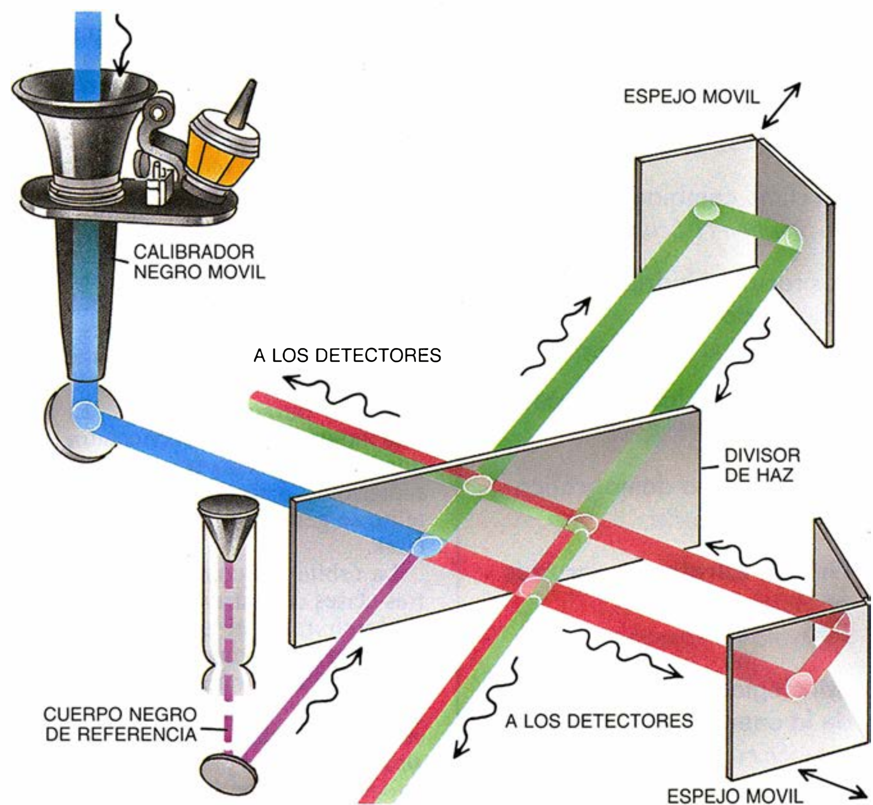
La radiación del cielo penetra en el instrumento por medio de un cono en forma de trompeta que elimina la radiación fuera de su eje. El haz resultante se divide en dos componentes que recorren caminos cuyas longitudes se controlan por medio de espejos móviles. El espectro se deduce de la interferencia de los dos haces después de recombinarse. El campo de visión del instrumnento es de siete grados, dirigido a lo largo del eje de rotación del vehículo espacial.

El tercer detector, el experimento de radiación de fondo difusa en el infrarrojo (DIRBE), medirá el brillo absoluto del cielo a longitudes de onda comprendidas entre 1 y 300 micrometros. Le compete realizar la más sensible búsqueda emprendida hasta ahora de la radiación difusa infrarroja procedente del primitivo universo: la luz de las primeras protogalaxias, galaxias y estrellas. El dominio espectral de la radiación indicaría la naturaleza de los procesos que la originaron. DIRBE tomará también importantes mediciones de las emisiones de las fuentes inmediatas: polvo interestelar e interplanetario, luz galáctica de las estrellas, galaxias infrarrojas, cuásares y cúmulos galácticos.

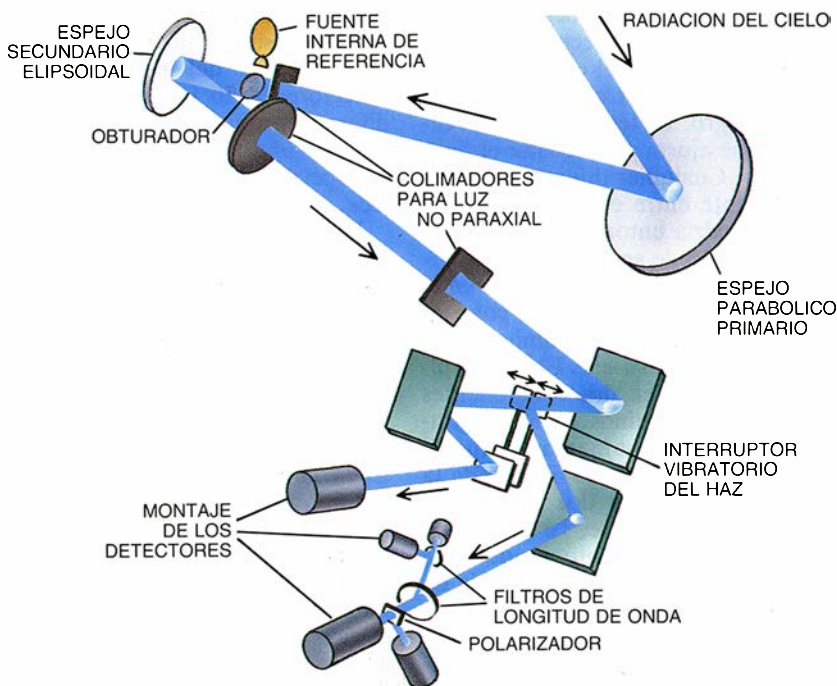
Las ópticas de DIRBE eliminan la luz desviada procedente de fuentes fuera del eje, así como la radiación del vehículo espacial y la del propio instrumento. Un sistema de deflectores de luz, pantallas de radiación y espejos aseguran que la radiación aportada por fuentes extrañas sea pequeña. El instrumento podrá medir la pequeña radiación residual de fondo con una sensibilidad de aproximadamente el 1 por ciento de la emisión local astrofísica de primera línea. El proyecto básico del instrumento es el de un telescopio gregoriano desalineado y sin oscurecer, con un diámetro del espejo primario de 20 centímetros; el campo de visión es de 0,7 por 0,7 grados. El telescopio se apunta desviado 30 grados respecto al eje de rotación del satélite; la rotación varía el ángulo entre la visual de DIRBE y el Sol. Un dispositivo semejante a un diapasón interrumpe el haz procedente del cielo 32 veces por segundo para comparar la radiación procedente de cada punto del cielo con el nivel casi nulo de luz de una superficie de referencia fría en el interior del instrumento. Hay detectores a 10 longitudes de onda diferentes que observan el mismo campo simultáneamente para cubrir el espectro desde 1 a 300 micrometros.

El DIRBE medirá también la polarización de la luz incidente en las tres bandas de longitudes de onda más cortas. Esta información le permitirá caracterizar la radiación solar difundida por el polvo interplanetario. Las cuatro bandas intermedias están dominadas por la emisión térmica del polvo interplanetario, pero los receptores en esas bandas detectarán la emisión difusa de una primitiva generación de estrellas. Los canales que miden las longitudes de onda más largas investigarán la radiación que pudiera reemitirse por el polvo intergaláctico producido en esta temprana generación de estrellas. DIRBE tiene suficiente sensibilidad y cobertura espectral para separar las emisiones del polvo planetario y galáctico de las fuentes cósmicas de interés. El análisis basado en las observaciones del DIRBE está admirablemente adaptado para responder las preguntas de si la radiación fue emitida por una temprana generación de estrellas o estructuras mayores y si tal radiación podría haber sido absorbida y reemitida por el polvo intergaláctico.

Entre los otros componentes del satélite hay un gran criostato (un depósito que contiene helio y está aislado al vacío), un escudo o pantalla de radiación desplegable, un sistema generador de energía y un sistema de control de posición respecto al espacio. El escudo protege a los instrumentos sensibles y al criostato de la radiación térmica solar y terrestre y de la interferencia de radiofrecuencia. El DIRBE y el FIRAS están montados dentro del criostato para mante-



*8. ESPECTROMETRO ABSOLUTO DE INFRARROJO LEJANO: compara el espectro de radiación del cielo a longitudes de onda desde 100 micrometros a un centímetro con la de un cuerpo negro, o radiador perfecto, interno; las diferencias entre ambas constituirían una prueba de que el universo experimentó procesos de gran energía hacia la época del desacoplamiento. Una bocina en forma de trompeta canaliza la radiación hasta un divisor de haz, que dirige las dos partes (*líneas verdes y rojas*) a lo largo de caminos cuyas longitudes se pueden variar mediante espejos móviles. Los haces componentes se recombinan después en el divisor de haz para producir una figura de interferencia que revela la naturaleza espectral de la señal.*



9. EL EXPERIMENTO de radiación difusa infrarroja de fondo: investiga la radiación de la primera generación de estrellas, escudriñándola en busca de la antigua distribución de materia a partir de la cual se formaron las estructuras cósmicas de hoy. La luz se recoge mediante un espejo primario; los rayos alejados del eje se eliminan mediante colimadores y pantallas. El haz se divide en 10 componentes, que atraviesan filtros de distinta longitud de onda. Se analiza la intensidad de todas las bandas; en tres de ellas se analiza la polarización.

nerlos a temperatura inferior a 2 K; esta disposición minimiza la radiación emitida por los propios instrumentos y permite el uso de detectores sensibles. El criostato contiene suficiente helio superfluido para enfriar el instrumento durante la misión. El DMR está montado fuera del criostato, aunque está protegido por el escudo de radiación. La energía eléctrica del satélite se genera mediante paneles solares.

La órbita del COBE permite que las tres clases de instrumentos científicos exploren todo el cielo mientras se mantienen a temperatura constante con interferencia mínima de la Tierra y el Sol. Se trata de una órbita circular y casi polar, a 900 kilómetros de altura, dispuesta para que quede cerca del terminador día-noche de la Tierra (el borde del hemisferio iluminado del globo). El sistema de control de posición respecto al espacio mantiene las visuales de los instrumentos alineadas a unos 90 grados del Sol y unos 180 de la Tierra. El vehículo espacial gira en bloque a razón de 0,8 revoluciones por minuto, dando un modo de exploración que reduce los errores sistemáticos en el DMR y confiere al DIRBE un dominio de ángulos de iluminación solar desde el cual puede observar las reflexiones del polvo interplanetario. Como el brillo del polvo interplanetario depende estrechamente de la latitud eclíptica y del ángulo de iluminación solar, la emisión por parte de esas partículas se reconocerá fácilmente y será por tanto sencillo extraerla de los datos. La rotación asegura también que el Sol caliente uniformemente el satélite, reduciendo los gradientes de temperatura en su interior.

Los datos recogidos por los instrumentos del COBE constituirán un paquete de información de alcance y precisión sin precedentes. La información se analizará y transcribirá en forma de mapas de la totalidad del cielo que abarcarán cuatro órdenes de magnitud de longitudes de onda.

A largo plazo, la mayor contribución del COBE será el conjunto de datos recogido, muchísimo más valioso que la suma de sus partes. La uniformidad del análisis, la posibilidad de que cada instrumento confirme los resultados de los otros y la propia amplitud de la información conducirán a un nivel de garantía inalcanzable en una misión de menores proporciones. La futura investigación del universo primitivo y su macroestructura dependerá del legado del COBE.

Ciencia y empresa

Paso a paso

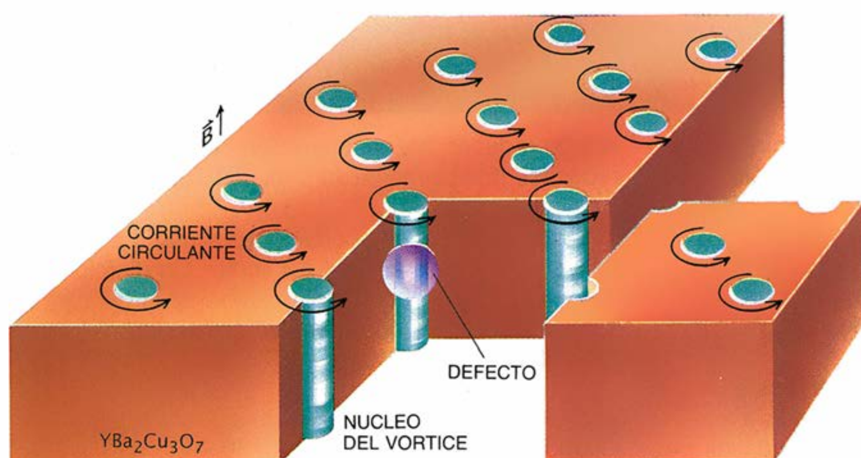
La carrera por comercializar los superconductores cerámicos de alta temperatura ha perdido impulso para acompasarse a la marcha constante del maratón. Los proyectos gigantes, recuérdese el de los trenes superconductores de alta temperatura, tardarán en materializarse. En contrapartida, los investigadores están progresando ante objetivos más modestos. Crean ya películas delgadas superconductoras de alta calidad y materiales de dimensiones grandes, tarea imposible hace menos de un año. Comienzan a controlar la "infiltración" del flujo magnético.

La infiltración del flujo magnético puede producirse cuando los investigadores tratan de hacer pasar corrientes intensas a través de masas superconductoras a temperaturas por encima de unos cuantos grados kelvin en presencia de un intenso campo magnético. Los vórtices de flujo del material se ven impulsados por la corriente e inhiben, así, el paso de ésta a través del superconductor. Varios grupos de investigación acaban de demostrar que pueden retardar la infiltración añadiendo diminutos defectos al cristal superconductor. Estas inclusiones "fijan" el flujo y permiten el paso de corriente por el material.

La meta inmediata es hallar una manera práctica de introducir los defectos. Se han creado defectos en los cristales descomponiendo itrio1-bario2-cobre4 (1-2-4) en itrio1-bario2-cobre3 (1-2-3). Un grupo de los laboratorios AT&T, dirigido por R. Bruce van Dover, empleó neutrones rápidos y haces de protones para provocar deformaciones útiles en cristales de compuestos 1-2-3. Se han conseguido densidades de corriente de 100.000 y 600.000 ampère por centímetro cuadrado.

Los investigadores conceden que procesar esos materiales convirtiéndolos en cables, cintas, etcétera, es todavía difícil. Muchos reciben con escepticismo las noticias de éxitos alcanzados por otros. A finales del año pasado, Kenichi Sato anunció que había desarrollado un cable de cerámica superconductora basado en un compuesto de bismuto-plomo-estroncio que se podía bobinar en cables de decenas de metros de longitud y dotado de una capacidad de corriente de 25.000 ampère por centímetro cuadrado. Prevé que dentro de un año se dispondrá de cables utilizables capaces de transportar 100.000 ampère.

"Aun cuando Sato tenga 10 metros [de alambre superconductor]", dice Hiroyasu Ogiwara, de Toshiba, "el problema es la calidad a lo largo de toda su longitud". Los usuarios comerciales, además, necesitarán varios kilómetros de cable, apostillan en el Instituto Nacional de Investigación de Metales del Japón. Lo que se necesita realmente es un alambre resistente y largo, capacitado para producir grandes campos magnéticos. Como tal campo magnético ejercerá una enorme tensión sobre el alambre superconductor, el material deberá estar dotado de buenas propiedades mecánicas.



1. REDUCCION DE LA INFILTRACION DEL FLUJO MAGNETICO mediante la introducción de defectos en un cristal superconductor. Un campo magnético externo, B, *induce vórtices (zonas de flujo magnético rodeadas por una corriente circulante) en el cristal, que se alinean en forma de matriz hexagonal. Una corriente que se haga circular por la muestra empuja a los vórtices (el efecto de infiltración del flujo) disipando energía e inhibiendo así la corriente. Los defectos en el cristal "fijan" los vórtices. Fuente: R. Bruce van Dover, Laboratorios AT&T Bell.*

Pese a ello, se está ensayando con algunas aplicaciones sencillas que incorporan superconductores a alta temperatura. Instituciones y empresas niponas han unido sus fuerzas para construir pequeñas pantallas cerámicas de itrio-bario-cobre que impidan el paso a los campos magnéticos ambientales. Tales pantallas sirven para mejorar las medidas de los débiles campos magnéticos producidos por el cerebro o por el corazón hechas con los habituales dispositivos superconductores de interferencia cuántica (SQUID).

Algunas empresas han construido prototipos de cavidades resonantes de radiofrecuencia y microondas mediante superconductores de itrio. Tales resonadores, que generan aproximadamente cien veces menos ruido que los dispositivos corrientes, podrían mejorar la sensibilidad de radios y radares, así como aumentar el número de canales en los teléfonos celulares.

Más atrasados están los SQUID de películas de alta temperatura. Los investigadores están logrando, con equipos experimentales, sensibilidades brutas comparables con las obtenidas en equipos convencionales de baja temperatura. Sin embargo, sigue siendo un problema explotar esta sensibilidad para hacer medidas útiles.

Quienes trabajan en la creación de dispositivos digitales activos —microprocesadores, por ejemplo— avanzan por un camino difícil y rocoso. Esos dispositivos habrían de estar constituidos por un aislante embutido entre capas de películas superconductoras. Pero ocurre que los superconductores a alta temperatura reaccionan con otras muchas substancias; y las que son compatibles, no toleran, por lo común, el entorno caliente y rico en oxígeno necesario para formar las capas superconductoras. El grabado químico de los circuitos en las películas, no menos delicado, puede degradar las propiedades superconductoras. La ventaja del silicio estriba en que sólo existe un componente, en tanto que los superconductores constan de cinco o seis elementos. Pero la

esperanza y el tesón acabarán rompiendo obstáculos. No se olvide que los materiales de alta temperatura tienen sólo dos años de edad.

Bancos del futuro

En lo profundo del corazón de Manhattan, en el sótano de un edificio gris de oficinas, Citibank está sometiendo a prueba la técnica de asistencia al cliente de la banca del futuro.

Durante más de una década, Citibank, una de las mayores instituciones financieras del mundo, ha empleado discretamente su "laboratorio de ensayos" para someter a prueba posibles nuevos servicios. Allí nacieron los cajeros automáticos. Más recientemente, proyectó el más moderno de los dispositivos de "banco en casa", un teléfono realzado al que se le ha dado el nombre de héroe de película: "ET".

Durante muchos años, el laboratorio fue un secreto incluso en el propio banco. (Citibank permitió a Investigación y Ciencia visitar el laboratorio con la condición de que no revelásemos su dirección.) La firma consultora McKinsey estima que el banco gastó alrededor de 1500 millones de dólares en 1988 en sistemas tecnológicos desde ordenadores hasta telecomunicaciones: alrededor del 13 por ciento del desembolso de la industria bancaria.

Con un montaje teatral, se crea el prototipo, se preparan los decorados de una sucursal —o de una salita de estar— y se invita a algunos voluntarios a que colaboren en los ensayos.

Citibank no pierde el tiempo en la construcción de prototipos. Cuando el banco empezó a experimentar con los primeros modelos de cajero automático, el propio vicepresidente del laboratorio se ocultaba tras la pantalla y entregaba el dinero. Sin embargo, los espejos semitransparentes y el conjunto de videocámaras que rodean las salas del laboratorio son reales. Empleados de Citibank observan y registran las reacciones del cliente ante un nuevo equipo, y, de acuerdo con los comportamientos, proceden a las rectificaciones oportunas.

La segunda visita, quizá definitiva, de ET a nuestro planeta, se gestó durante más de dos años en el laboratorio, explorando la mejor manera de fomentar las transacciones financieras en casa. Los bancos saben que los clientes se resisten a realizar sus transacciones por medio de ordenadores personales.

El grupo pensó entonces en un sistema apoyado en el teléfono. Se ensayó con múltiples modelos antes de llegar a la conclusión de que el aparato debía tener el aspecto y el funcionamiento de un teléfono de mesa, en primer lugar y, en segundo, el de un útil bancario. Los mensajes que aparecen en la pantalla también fueron cuidadosamente preparados. La gente se sentía más a gusto cuando los mensajes eran amistosos, sin llegar a marear.

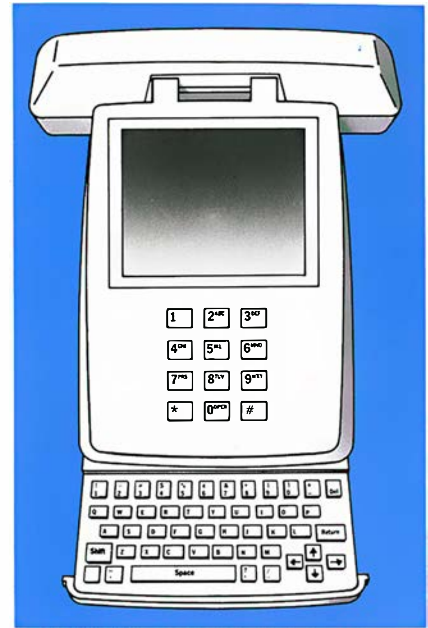
El usuario puede hacer una llamada telefónica corriente o puede, apretando la tecla "#", provocar la aparición de un menú de opciones en la pantalla incorporada. Puede entonces marcar una llamada, añadir números a una lista interna pulsando los detalles en un teclado ocultable o ponerse al habla con su cuenta bancaria. La selección de la opción "cuenta bancaria" trae otro menú con opciones, entre las cuales existe la de hallar el balance de la cuenta, pagar facturas, conocer el tipo de interés actual de su banco o caja de ahorros, etcétera. Una vez finalizada la transacción, la pantalla se despide del cliente con una frase amable.

El banco dice que no está usando la técnica para reducir personal. En el último decenio, subraya, ha aumentado la plantilla laboral, aun cuando sus inversiones en tecnología han crecido vertiginosamente. Pero no ha logrado disipar todas las inquietudes. La empresa sostiene que la técnica —tal como el nuevo teléfono— ayuda a los empleados a dejar de ser meros resolutores de las necesidades de los clientes para convertirse en sus asesores de anticipación de las mismas.

Bonanza para los anticuerpos

Ni la galerna cántabra levanta el oleaje que el Instituto de Investigación Scripps acaba de remover en la industria de la biotecnología. En noviembre del pasado año, Andrew Hiatt y sus colaboradores anunciaron en *Nature* que habían producido anticuerpos en plantas de tabaco: todo un logro, porque sólo los animales fabrican de modo natural esas proteínas contra antígenos invasores. Un mes más tarde, Richard A. Lerner, William D. Huse y sus colaboradores presentaron en *Science* una técnica bacteriana para producir y filtrar, con una celeridad desconocida, millones de variedades de anticuerpos monoclonales.

La importancia potencial que esos descubrimientos pueden revestir en la aplicación práctica se presume espectacular. Los anticuerpos monoclonales se unen selectivamente a blancos



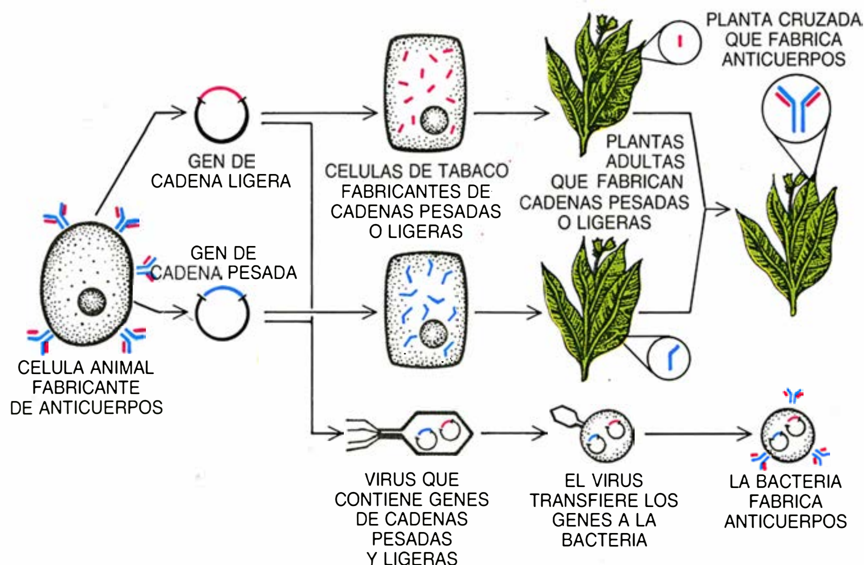
2. TELEFONO RESALTADO desarrollado por Citibank. Le ofrece, en pantalla, al usuario el estado de su cuenta y el mejor movimiento de la misma. Cumple también todas las funciones propias del teléfono.

moleculares específicos; la terapia farmacéutica los está demandando con apremio. Las nuevas técnicas podrían, por otro lado, recortar drásticamente el precio de los anticuerpos monoclonales.

Pero no es lo mismo pasar del laboratorio a la botica que aparecer en los titulares de los periódicos. La respuesta de la comunidad científica ante la introducción con éxito de genes de anticuerpos en las plantas de tabaco por parte de Hiatt ha sido unánime y entusiasta; la respuesta de las empresas, más moderada. Johnson & Johnson, que financia la investigación biomédica en Scripps y comercializa varios productos basados en anticuerpos monoclonales, ha declinado ya pedir licencia para usar el descubrimiento de Hiatt.

Las fuentes de la compañía dicen que el trabajo no encajaba en la actual estrategia de investigación empresarial. Algunos fabricantes de anticuerpos monoclonales sugieren que los "planticuerpos" están todavía demasiado lejos de su nivel de explotación y cuestionan que la técnica resuelva los problemas.

Sin dejarse impresionar, Hiatt indica tres aplicaciones potenciales de los planticuerpos. En los productos farmacéuticos, los planticuerpos se mostrarían más remisos a provocar reacciones inmunológicas en los seres



*3. FABRICACION DE ANTICUERPOS MONOCLONALES facilitada mediante dos nuevas técnicas desarrolladas en el Instituto de Investigación de Scripps Clinic. Los anticuerpos están formados por cadenas pesadas (*azul*) y cadenas ligeras (*rojo*) codificadas por distintos genes. En el método del "planticuerpo", los genes de las cadenas pesada y ligera se aíslan y transfieren, por separado, a células de plantas de tabaco. Esas células y las plantas adultas en que se convierten producen cadenas pesadas o ligeras. Si una planta productora de cadenas pesadas se cruza con otra que produce cadenas ligeras, una cuarta parte de las plantas resultantes producen ambas cadenas, que se disponen en anticuerpos completos. Una segunda técnica empaqueta en ciertos virus millones de pares de genes de cadenas ligeras y pesadas procedentes de células fabricantes de anticuerpos. Los virus infectan a las bacterias, que producen entonces anticuerpos.*

humanos que los anticuerpos corrientes, que se desarrollan en células de ratones. Los cultivos que contuvieran planticuerpos contra agentes patógenos vegetales opondrían mayor resistencia a las enfermedades. Finalmente, las plantas con planticuerpos contra la contaminación podrían también, quizá, extraer los productos químicos tóxicos del agua del subsuelo.

Hiatt confía en su menor coste. Los anticuerpos monoclonales se fabrican en cultivos de hibridomas, formados por células del sistema inmunitario de los ratones fundidas con células de tumores. Como la producción de anticuerpos es pequeña, los costes se disparan: 600.000 pesetas por gramo, según algunas fuentes industriales. Extrapolando de la producción de proteínas que ha recogido, Hiatt estima que un gramo de planticuerpos podría costar sólo 10 pesetas.

Sin embargo, es el primero en reconocer que su cálculo puede pecar de exagerada simplificación. No tiene en cuenta el costo de purificación de los planticuerpos. Otros afirman que, mientras que fabricar unos gramos de un nuevo anticuerpo podría costar cientos de miles de pesetas, el coste unitario cae cuando las empresas producen cantidades industriales.

¿Qué ventajas promete el trabajo de Lerner con las bacterias? La fabricación de anticuerpos con las bacterias no es nueva, pero sí lo es la técnica de Lerner. Después de aislar y copiar grandes números de genes diferentes en busca de componentes de anticuerpos de las células del sistema inmunitario, él y sus colaboradores emparejaron los genes al azar. Estas nuevas combinaciones se empaquetaron en virus, que infectaron las bacterias e introdujeron los genes de los anticuerpos. La bacteria genéticamente modificada sintetizaba entonces los anticuerpos.

Mientras que con los hibridomas se puede tardar años en producir y cribar algunos miles de anticuerpos monoclonales para hallar una molécula con una especificidad deseada, Lerner produce y criba millones de nuevos anticuerpos de bacterias en menos de una semana. Cree que su técnica se prestará a la síntesis de anticuerpos monoclonales derivados del sistema inmunitario humano, lo que podría ser más seguro o más eficaz en los preparados farmacéuticos.



¿Qué mecanismo gobierna los ciclos glaciales?

Vastas reorganizaciones del sistema océano-atmósfera constituyen acontecimientos decisivos para ligar los cambios cíclicos de la órbita terrestre con el avance y retroceso de la capa de hielos

Wallace S. Broecker y George H. Denton

Por ocho veces en el último millón de años, algo cambió en la ecuación climática de la Tierra, que permitió que la nieve permaneciera en montañas y latitudes septentrionales donde anteriormente no cuajaba. La nieve se comprimió hasta convertirse en hielo y éste se acumuló formando glaciares y barreras. En el transcurso de decenas de miles de años, las capas de hielo alcanzaron espesores de varios kilómetros; aplanaron las tierras, las pulimentaron y dejaron sus huellas, incluso en Europa Central y el Medio Oeste de los EE.UU. De repente acaba el ciclo glacial. Apenas unos miles de años, y los hielos se retiraron de nuevo hasta sus límites actuales.

A lo largo de los últimos treinta años, se han ido acumulando pruebas que atribuyen a factores astronómicos la razón última de esos ciclos glaciales: lentas variaciones cíclicas de la excentricidad de la órbita terrestre y de la inclinación y orientación del eje de rotación del planeta. Al alterar la intensidad de las estaciones, los ciclos astronómicos inclinan el fiel hacia la expansión, o retirada, de los glaciares. Pero, ¿cuál es la relación entre los ciclos astronómicos y los períodos glaciales? ¿Cómo revierten los cambios estacionales en cambios globales del clima?

1. CAMPO DE HIELO EN PATAGONIA. Termina en un profundo lago glacial. Los glaciares del hemisferio Sur se han extendido y retirado al unísono con las grandes masas de hielo septentrionales, según la datación mediante radiocarbono de la vegetación que fue arrasada por el avance de los glaciares o que creció tras su retirada. (Los árboles que aparecen en primer plano podrían ser objeto de esa medida en el futuro.) El calendario es un rompecabezas, porque la intensidad de la insolación en verano, que se cree influye sobre el crecimiento de los hielos, cambia según pautas completamente diferentes en las latitudes medias de los dos hemisferios.

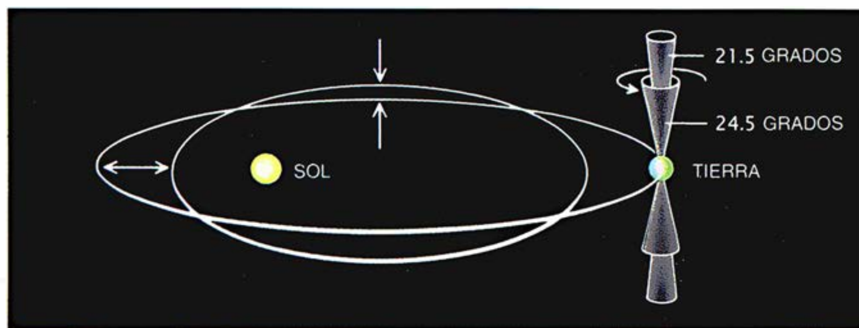
Cualquier respuesta que se dé deberá enfrentarse con el cúmulo de indicaciones que se han ido recogiendo sobre la naturaleza, la pauta temporal y la magnitud de las variaciones climáticas que acompañaron los avances y las retiradas de los hielos. Muchos investigadores han propuesto la hipótesis según la cual las variaciones estacionales actúan directamente sobre las masas de hielo del hemisferio Norte. Una reducción de la radiación solar en verano permite el crecimiento de las masas de hielo, mientras que el incremento de la misma las funde; los hielos, a su vez, alteran el clima terrestre. Nosotros, por el contrario, creemos que las glaciaciones fueron una consecuencia de sucesos climáticos más amplios. Al alterar las distribuciones de pluviosidad y evaporación, los cambios de intensidad de las estaciones parecen haber provocado que el océano y la atmósfera (un sistema único acoplado) salte de un modo de operación a otro muy diferente. Con cada salto, cambió la circulación oceánica, el transporte de calor alrededor del globo tuvo lugar de manera diferente, se alteraron las propiedades de la atmósfera, cambió el clima y, como consecuencia, las masas de hielo se expandieron o retrajeron.

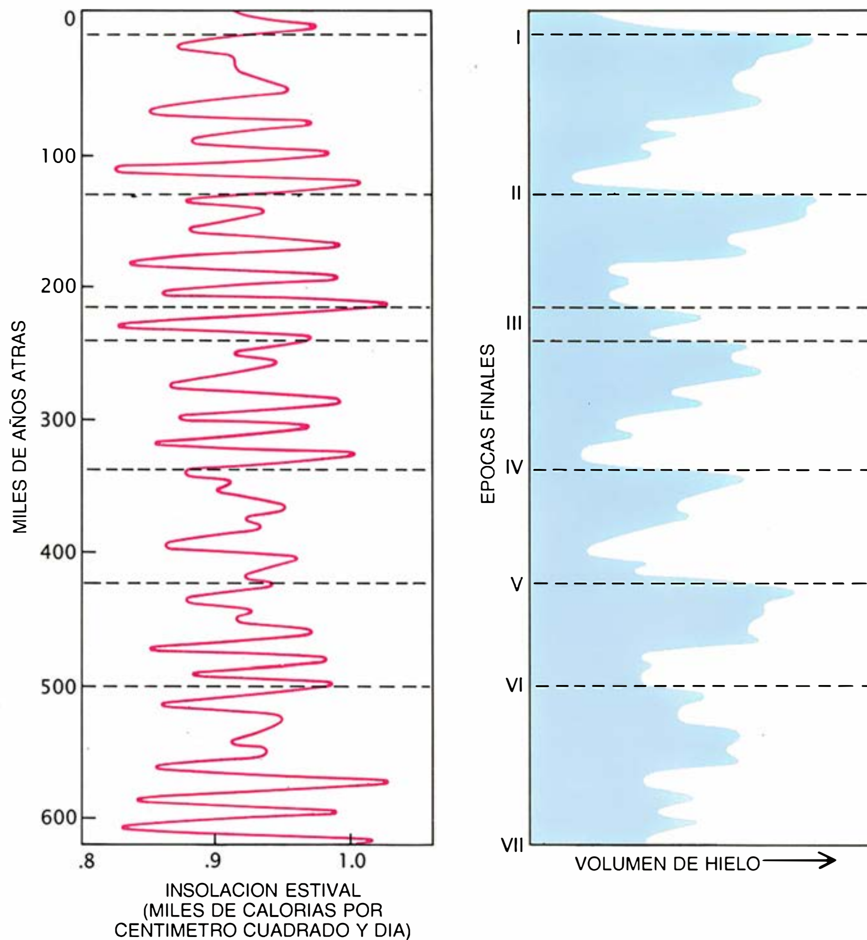
Nuestra propuesta no supone un rechazo de la teoría astronómica de los períodos glaciales, sino una ampliación de la misma. La hipótesis fue avanzada en 1842, a los pocos años de que el naturalista suizo-americano Louis Agassiz sostuviera que las rocas pulidas y estriadas y los montones de detritus de los Alpes registraban una antigua edad de glaciares. En esa época, el matemático francés Joseph A. Adhémar sugirió que las variaciones de intensidad de las estaciones provocadas por factores astronómicos podrían desencadenar glaciaciones periódicamente.

El astrónomo yugoslavo Milutin Milankovitch refinó y formalizó la hipótesis en los decenios de 1920 y 1930. El mecanismo astronómico que él proponía constaba de tres componentes; dos alteran la intensidad de las estaciones y el tercero afecta a la interacción entre aquéllos. El primero es la inclinación del eje de rotación de la Tierra. Actualmente desviado unos 23,5 grados respecto a la vertical, fluctúa desde 21,5 grados hasta 24,5 grados con un período de 41.000 años. Cuanto mayor sea la inclinación, tanto más extremas resultarán las estaciones en ambos hemisferios: los veranos se hacen más cálidos y los inviernos más crudos.

El segundo factor que acentúa las variaciones estacionales, más débil, es la forma de la órbita terrestre. Con un período de 100.000 años, la órbita se estira, haciéndose la elipse más excéntrica y retornando después a una forma más circular. Cuando aumenta

WALLACE S. BROECKER y GEORGE H. DENTON aportan distintos intereses a sus estudios de las glaciaciones. Broecker obtuvo el doctorado en la Universidad de Columbia en 1958 y ha proseguido su carrera allí, en uno de cuyos centros, el Observatorio Geológico Lamont-Doherty, enseña geoquímica. Además de los climas antiguos, se preocupa por la química oceánica, datación mediante isótopos y ciencias del ambiente. Denton es profesor de geología en la Universidad de Maine. Tras doctorarse por la de Yale en 1965, se trasladó a la Universidad de Estocolmo y, de ésta, a la de Maine. Ha pasado 36 estaciones en el campo estudiando el calendario y extensión de los avances de los glaciares, 22 de ellas en la Antártida y en otros lugares del hemisferio Sur.





2. CICLOS ASTRONOMICOS (*arriba*), reguladores del desarrollo de la glaciación. Los ciclos —de entre 23.000 y 100.000 años de duración— influyen en la excentricidad de la órbita terrestre, la orientación de su eje de rotación (que describe lentamente un cono en el espacio) y la inclinación del eje (que afecta a la abertura del cono). El efecto ejercido por los cambios sobre la intensidad de la insolación estival en las altas latitudes del hemisferio Norte se representa a la izquierda. La curva de la derecha indica el volumen de las masas de hielo terrestres, determinada a partir de estudios isotópicos de sedimentos de los fondos marinos. El volumen de los hielos aumenta gradualmente a lo largo de unos 100.000 años, después de lo cual desciende bruscamente en los episodios del final de los períodos glaciales, que corresponden a períodos de creciente insolación estival en latitudes septentrionales. (La estacionalidad varía de manera diferente en el hemisferio Sur, señal de que debe ser la del hemisferio Norte la que rija los períodos glaciales.) (Esquemas de George Retseck.)

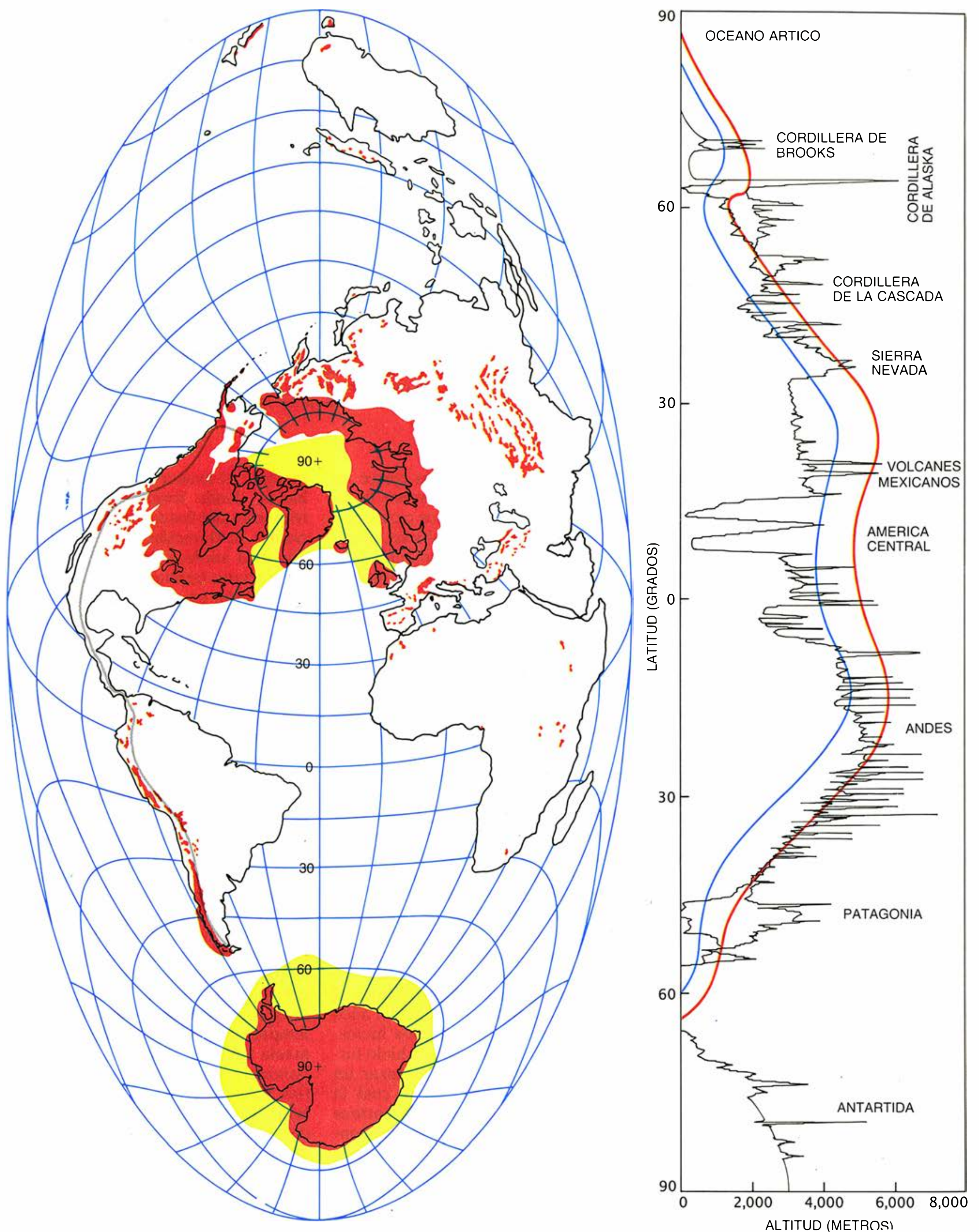
la excentricidad orbital, aumenta la diferencia de distancia entre la Tierra y el Sol en sus puntos más próximo y más lejano, intensificándose las estaciones en un hemisferio y moderándose en el otro. (En la actualidad, la Tierra alcanza su punto más alejado del Sol durante el invierno del hemisferio Sur; en virtud de ello, los inviernos del hemisferio Sur son un poco más fríos y los veranos un poco más cálidos que sus homólogos septentrionales.)

Una tercera fluctuación astronómica rige la interacción entre los efectos de la inclinación y la excentricidad. Nos referimos a la precesión; así se llama el bamboleo del eje de rotación de la Tierra, que describe una circunferencia completa respecto a las estrellas fijas aproximadamente cada 23.000 años. La precesión determina si el verano en un hemisferio dado cae en un punto cercano o lejano de la órbita; dicho de otra manera, si la inclinación y la distancia se oponen mutuamente o colaboran entre sí para reforzar las estaciones. Cuando esos dos factores que influyen en la estacionalidad se apoyan entre sí en un hemisferio, se contraponen en el hemisferio opuesto.

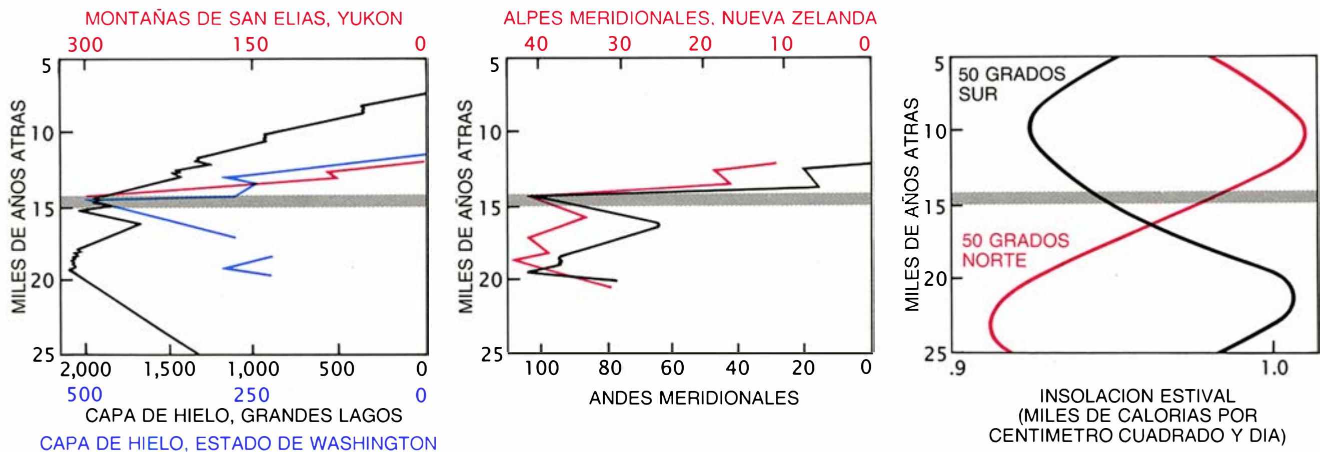
Milankovitch calculó que esos tres factores actúan conjuntamente haciendo variar, hasta en un 20 por ciento, la irradiancia solar recibida en las altas latitudes septentrionales durante el verano, lo que, según argumentaba, basta para permitir que las grandes masas de hielos se extiendan sobre los continentes del hemisferio boreal en las épocas de veranos frescos e inviernos suaves. Durante muchos años, sin embargo, la falta de un registro independiente que indicara los momentos en que habían tenido lugar los períodos glaciales impidió someter a prueba la hipótesis.

A principios de los años cincuenta, Cesare Emiliani, que trabajaba en el laboratorio de Harold C. Urey en la Universidad de Chicago, presentó la primera historia completa que mostraba el avance y retroceso de los hielos durante las últimas glaciaciones. La obtuvo de un lugar insólito: el fondo del océano. Los foraminíferos, organismos marinos unicelulares, se alojan en conchas formadas por carbonato cálcico. Cuando mueren se hunden y pasan a engrosar los sedimentos de los fondos oceánicos; el carbonato de sus conchas sigue conservando ciertas características del agua de la zona que habitaban. En particular, la razón de un isótopo pesado del oxígeno (oxígeno 18) al oxígeno ordinario (oxígeno 16) en el carbonato registra el cociente de los dos oxígenos en las moléculas de agua.

Se sabe ahora que la relación de los isótopos en las aguas marinas guarda estrecha relación con la proporción global de agua encerrada en forma de glaciares y capas de hielo. La relación se explica por una especie de destilación meteorológica. Las moléculas de agua que contienen el isótopo más pesado tienden a condensarse y caer en forma de precipitación un poco más fácilmente que las moléculas que alojan el isótopo más ligero. De aquí que, a medida que el agua se evaporaba de los océanos calientes y el vapor se alejaba de su fuente, su oxígeno 18 retornó preferentemente a los océanos en forma de precipitación. La que terminaba por caer en forma de nieve sobre los campos de



3. MASAS DE HIELO y glaciares de montaña: avanzaron en ambos hemisferios durante la última glaciación. El mapa (una proyección equiárea poco corriente) muestra la extensión de los hielos terrestres (*rojo*) y marinos (*amarillo*) en los continentes durante el máximo de la glaciación, hace 19.500 años. (Los hielos terrestres se prolongaba más allá de algunas de las actuales costas porque el nivel del mar era más bajo.) La gráfica representa la altura media de la línea nival en las montañas de la cordillera americana, señaladas a lo largo del corte Norte-Sur indicado en el mapa. Las líneas nivales del período glacial (*azul*) estaban 1000 metros por debajo de las líneas nivales de hoy (*rojo*), con independencia de la latitud.



4. CALENDARIO de la retirada de los hielos; siguió idénticas pautas en el hemisferio Norte (*izquierda*) y en el hemisferio Sur (*centro*). Las gráficas dan la extensión de los glaciares de montaña y de las masas de hielo desde su región de origen (en kilómetros) y muestran que, en todos los casos, la espectacular retirada comenzó hace 14.000 años. Los cambios de intensidad estacional no pudieron haber impulsado directamente la retirada, porque, aun cuando los veranos del hemisferio Norte se iban haciendo más intensos, los del hemisferio Sur se iban, por contra, debilitando (*derecha*).

hielo y glaciares se halla relativamente empobrecida en oxígeno 18. Al acumularse el hielo pobre en oxígeno 18, los océanos quedaron enriquecidos en el isótopo. Cuanto más crecieran las masas de hielo, tanto más subiría la proporción de oxígeno 18 en el agua del mar y, por tanto, en los sedimentos.

Analizando testigos extraídos de los sedimentos de los fondos marinos, Emiliani halló que la relación isotópica ascendía y descendía, en buen acuerdo con los ciclos que Milankovitch había predicho. Desde aquel trabajo pionero, se han tomado mediciones de relación isotópica del oxígeno en cientos de testigos. Una cronología del registro combinado permitió a James D. Hays, de la Universidad de Columbia, John Imbrie, de la Brown, y Nicholas Shackleton, de Cambridge, demostrar en 1976 que el registro muestra precisamente las mismas periodicidades que los procesos orbitales.

A lo largo de los últimos 800.000 años, el volumen global de hielo ha alcanzado un máximo cada 100.000 años, concordando con el período de la variación de la excentricidad. Además, las "arrugas" superpuestas a cada ciclo —reducciones o aumentos a menor escala del volumen de hielo— se han sucedido a intervalos de unos 23.000 y 41.000 años, en concordancia con las frecuencias de la precesión y la inclinación. Más tarde, Imbrie, trabajando con el grupo SPECMAP, reforzó todavía más la defensa de la teoría astronómica cuando mostró que la amplitud de las señales de período más corto había variado exactamente según cabía esperar si estuvieran moduladas por la estacionalidad debida a la distancia.

Quedaban cabos sueltos. La variación de cada 100.000 años ejerce un efecto mucho más débil sobre la insolación estacional que los ciclos cortos, y, sin embargo, establece, al parecer, la frecuencia fundamental de la glaciación. Los ciclos más cortos aparecen sólo en las pequeñas oscilaciones (arrugas) del archivo isotópico. Es más, los ciclos de variación estacional calculados suben y bajan de forma suave, pero la curva del hielo presenta contornos con dientes de sierra: el hielo aumenta episódicamente durante casi 100.000 años y después se desintegra en pocos miles, en la época de veranos septentrionales extremos.

Los investigadores han buscado la respuesta a ambas cuestiones en la física de las capas de hielo y del fondo rocoso subyacente, que se hunde bajo el peso del hielo. Así, William L. Peltier y William T. Hyde, de la Universidad de Toronto, han elaborado un modelo teórico que incluye hipótesis sobre el hundimiento del fondo rocoso y que reproduce muy de cerca el predominio del ciclo de 100.000 años y la pronta retracción de los hielos. Según el modelo, la masa de hielo tarda casi 100.000 años en alcanzar un tamaño crítico, punto en el cual la roca dúctil que subyace a la corteza terrestre comienza a fluir rápidamente y deja que la corteza sobrecargada se hunda. La superficie de la capa de hielo desciende; a menor altura, el hielo se calienta más y puede fundirse con rapidez cuando los ciclos de período más corto traen el próximo episodio de intensos veranos septentrionales.

El modelo de Peltier y Hyde, como muchos otros, supone que son los cambios de estacionalidad en el hemisferio Norte los que rigen directamente el avance y retroceso de los hielos, dando forma a cada ciclo la respuesta del fondo rocoso y estableciendo su duración. No obstante, la hipótesis adolece de un fallo crucial: los glaciares también se extendieron y se retiraron en el hemisferio Sur. Estudios realizados por varios geólogos, entre ellos John H. Mercer, de la Universidad de Ohio, y Stephen C. Porter, de la de Washington, muestran que, durante la última glaciación, el clima cambió al mismo tiempo y en cuantía comparable en las latitudes medias del hemisferio Sur, aun cuando allí la estacionalidad varía de acuerdo con un calendario completamente diferente.

Estos y otros autores han descubierto, por ejemplo, que, durante la última edad del hielo, los glaciares de las zonas montañosas también se expandieron. Las pruebas —deducidas de las morrenas, montones de restos rocosos arrojados por los glaciares a su paso— son tan claras en los trópicos (Nueva Guinea, Hawai, Colombia y Africa oriental) y en las latitudes templadas meridionales (Chile, Tasmania y Nueva Zelanda) como en las latitudes templadas septentrionales (las Cascadas, los Alpes y el Himalaya). En todas las montañas estudiadas hasta ahora, con independencia de su configuración geográfica o de la intensidad de las precipitaciones, bajó alrededor de un kilómetro la línea nival, lo que corresponde a un descenso de temperatura de unos cinco grados Celsius.

Donde las morrenas aprisionaron materia orgánica, la datación mediante radiocarbono muestra que los glaciares avanzaron y se retiraron con la misma pauta temporal. Fluctuaron en torno a su máxima extensión entre 19.500 y 14.000 años atrás, aproxi-

madamente al mismo tiempo en que pasaba por su máximo la glaciación de los continentes septentrionales. Después, justo al mismo tiempo que la banquisa septentrional comenzó a retroceder, los glaciares montañosos sufrieron una espectacular mengua que redujo bruscamente su tamaño, hace aproximadamente 12.500 años.

¿Cómo podrían las variaciones de la insolación estival en Islandia haber provocado el avance y retroceso de los glaciares en los Andes meridionales o en Nueva Zelanda? Si los ciclos orbitales gobiernan los ciclos glaciales actuando directamente sobre las masas de hielos septentrionales, la respuesta a las variaciones de estacionalidad en las altas latitudes del hemisferio Norte debe adquirir suficiente intensidad para prevalecer sobre los efectos, totalmente diferentes, de las variaciones en el hemisferio Sur. Una posibilidad es que las propias masas de hielo septentrionales traduzcan la estacionalidad del hemisferio Norte en cambios climáticos globales.

Se han propuesto dos razones de enlace entre las masas de hielo septentrionales y el avance mundial de los hielos, pero ninguna de ellas resiste el envite de un examen minucioso. Una invoca el nivel del mar, que debió descender cuando el crecimiento de los hielos septentrionales se llevó buena parte del agua existente en el mundo. Como los glaciares pueden crecer solamente en tierra, el descenso del nivel del mar pudo haber permitido la expansión de los glaciares meridionales hasta cubrir las plataformas continentales, ahora expuestas, incluso sin cambio global alguno de temperatura. Más tarde, cuando se fundieron las masas de hielo septentrionales, el aumento del nivel del mar debió erosionar los bordes de los glaciares del hemisferio Sur, obligándolos a retirarse. La explicación, sin embargo, sólo es plausible para la Antártida, porque la mayoría de los glaciares de montaña ni siquiera se acercan al mar.

La segunda propuesta se basa en el alto albedo, o reflectividad, de las vastas masas de hielo septentrionales. Al reducir la absorción de la radiación solar del planeta, los hielos podrían haber provocado un enfriamiento global que permitiese el crecimiento de los glaciares en las latitudes meridionales. Pero los modelos climáticos de ordenador muestran que los efectos de los hielos del hemisferio Norte sobre el albedo deben confinarse a las latitudes septentrionales. Además, si el efecto de los hielos sobre el albedo rigiera el cambio climático, lo lógico sería encontrar un pronunciado gradiente de norte a sur en el registro de los glaciares montañosos, de modo que las montañas adyacentes a las masas de hielo septentrionales registraran el máximo descenso de la línea nival, y los Andes, por poner un ejemplo, mostraran muy poca variación. No se encuentra tal gradiente.

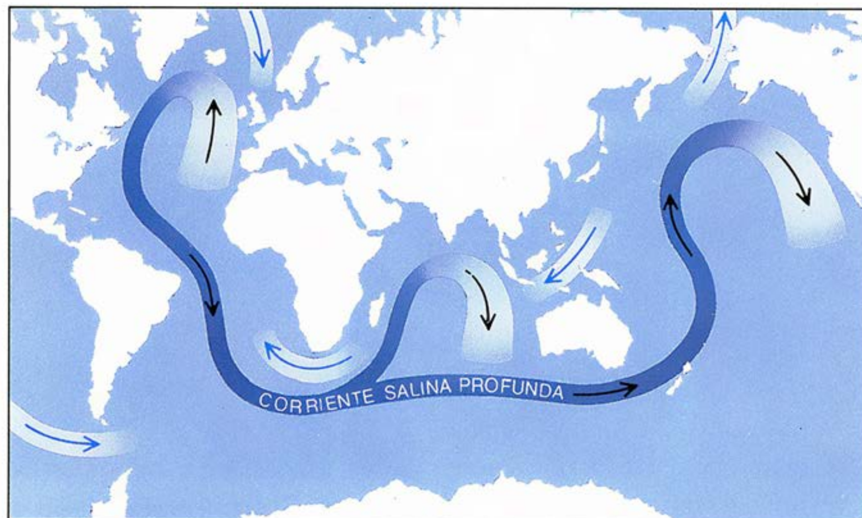
Cualquier relación causal entre el cambio climático global y los hielos debe también explicar la pauta temporal de la retirada de los glaciares de montaña. Las masas de hielo septentrionales y los glaciares de montaña iniciaron su retroceso desde el último máximo glacial en la misma época, hace unos 14.000 años. Los glaciares continentales tardaron unos 7000 años en fundirse, mientras que los glaciares de montaña se retiraron mucho más rápidamente. La disparidad sugiere que los hielos septentrionales no son los que llevan la batuta de los cambios climáticos sobre el resto de la Tierra.

Si los hielos por sí solos no pueden enlazar los ciclos astronómicos con los cambios climáticos, ¿qué puede hacerlo? Hay indicaciones procedentes de testigos obtenidos perforando hasta dos kilómetros de profundidad los hielos que cubren todavía Groenlandia y la Antártida. Lo primero que ofrecen los testigos de hielo es la confirmación del carácter global y sincrónico de los cambios climáticos de las edades de hielo.

Aunque el hielo glacial es en general pobre en oxígeno 18, el contenido exacto registra la temperatura local en la época en que se formó el hielo. (Cuanto más se enfría una burbuja de aire, tanto mayor es la probabilidad de que buena parte de su vapor haya caído ya en forma de precipitación, reduciendo el contenido en oxígeno 18 del vapor restante.) Los estudios isotópicos de los testigos de Groenlandia y la Antártida muestran que, durante la última glaciación, ambos polos se enfriaron —llegando hasta 10 grados Celsius por debajo de su temperatura actual— y se calentaron al unísono.

El hielo reveló también algo mucho más intrigante. Grupos dirigidos por Hans Oeschger, de la Universidad de Berna, y Claude Lorius, del Laboratorio de Glaciología y Geofísica del Medio Ambiente, en Grenoble, midieron el contenido en dióxido de carbono de las diminutas burbujas de aire que habían quedado aprisionadas en el hielo. Hallaron que, durante la última glaciación, el contenido en dióxido de carbono de la atmósfera era de unos dos tercios de su nivel interglacial. La curva del dióxido de carbono descubría un ingrediente que faltaba en la receta climática: el océano.

Sólo una alteración drástica del comportamiento del océano podría explicar cambio tan espectacular de la composición atmosférica. Después de todo, los océanos contienen una cantidad de dióxido de carbono 60 veces superior a la de la atmósfera; como el gas se difunde fácilmente a través de la superficie de separación océano-atmósfera, su concentración en las aguas superficiales regula la concentración atmosférica.



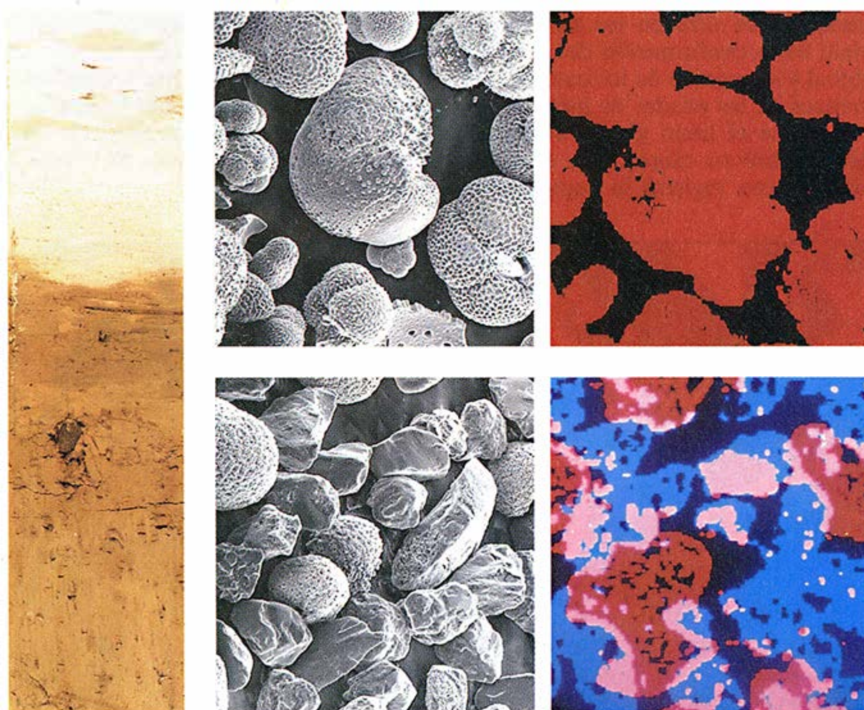
5. CORRIENTE SALINA PROFUNDA, que recorre los océanos, compensando el transporte de vapor de agua por la atmósfera. (Las flechas de color azul claro indican la corriente superficial de retorno.) La corriente se origina en el Atlántico Norte, donde el agua caliente que avanza hacia el Norte, y es anormalmente salina (y por tanto densa), se enfría en virtud del exceso de evaporación; con ello, su densidad aumenta todavía más. El agua se hunde en el abismo y corre hacia el Sur, hasta salir del Atlántico. La mayor parte del agua salada suministrada por este mecanismo de cinta transportadora atlántica se mezcla, en el Pacífico, con la de encima y compensa allí el exceso de precipitación. El mecanismo de transporte atlántico quedó desorganizado durante el período glacial.

A su vez, los organismos controlan la concentración de las aguas superficiales; actúan de bomba biológica que transporta dióxido de carbono desde la superficie hasta las profundidades oceánicas. En el curso de la fotosíntesis, las diminutas plantas verdes de la superficie oceánica iluminada capturan dióxido de carbono disuelto para formar tejidos orgánicos. Parte de la materia que constituye las plantas, así como la materia animal que se alimenta de ellas, se hunde con el tiempo en las profundidades oceánicas, donde las bacterias la oxidan de nuevo a dióxido de carbono. De esta manera, el gas sufre un bombeo continuo hacia el abismo, junto con fosfatos y nitratos, entre otros nutrientes.

La eficacia de este bombeo no depende sólo de la población y especies del plancton, sino también de la mezcla vertical. La relación exacta entre la eficacia de la bomba y la circulación oceánica es una cuestión debatida, pero cabe imaginar, por ejemplo, que, si se hace más lenta la mezcla de las aguas profundas con las superficiales, el fitoplancton tendrá más tiempo para empobrecer en dióxido de carbono las aguas superficiales, antes de que la agitación aporte nuevo gas de las profundidades. Durante la época glacial, la combinación que conjugara alteraciones en la mezcla con cambios en la ecología hubo de aumentar la eficacia de la bomba biológica.

Las primeras señales de que el océano de la edad de hielo operaba de manera diferente las aportó el registro fósil: cambios en las poblaciones de microorganismos que habitan en masas de agua de temperatura y salinidad específicas, estudiados por William E. Ruddiman y Andrew McIntyre, de la Universidad de Columbia, y por Detmar F. Schnitker, de la de Maine. Más recientemente, una técnica geoquímica iniciada por Edward A. Boyle, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, proporcionó una confirmación espectacular y directa de que el océano circulaba de forma distinta durante la última glaciación.

Boyle descubrió que, por razones desconocidas, la distribución de cadmio en los océanos actuales reproduce fielmente las de los nutrientes fosfatados y nitratados. Habida cuenta de que el ion cadmio tiene la misma carga y tamaño que el calcio, Boyle supuso que aquél podría sustituir a éste en el carbonato cálcico de las conchas de los foraminíferos. Si así fuera, las mediciones de cadmio en las conchas de los testigos de sedimentos podrían revelar la distribución de nitratos y fosfatos en los océanos glaciales.

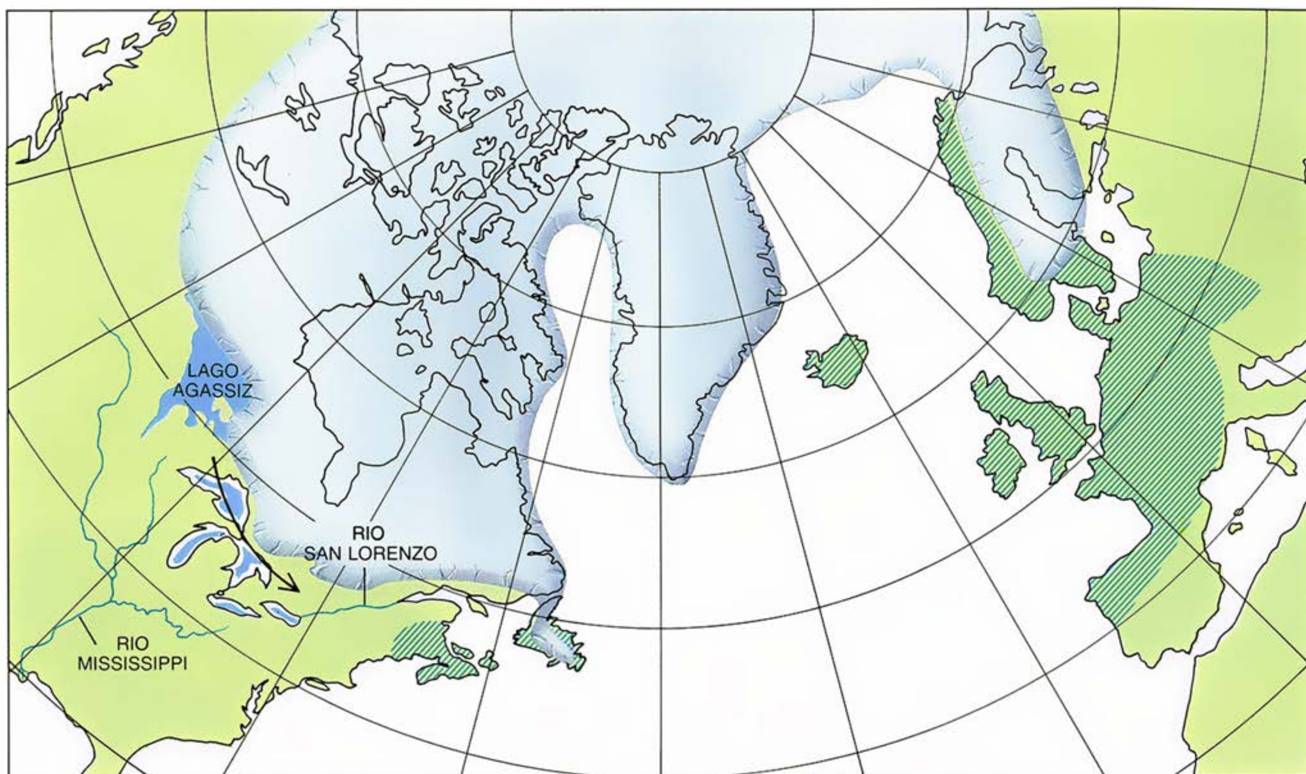


6. TESTIGO DE SEDIMENTOS (*izquierda*) del Atlántico Norte, que da fe de un brusco cambio en la circulación al final de la penúltima glaciación, hace 128.000 años. La transición (descubierta por Gerard C. Bond, de la Universidad de Columbia) abarca algunos milímetros y representa unos 50 años. La micrografía, con microscopio electrónico de barrido, del material grueso de los sedimentos oscuros (*abajo*) revela abundantes fragmentos rocosos, ricos en silicio (*azules en la fotografía de rayos X*), presumiblemente provenientes de témpanos en fusión. Los sedimentos de color claro (*arriba*) apenas contienen roca y están constituidos sobre todo por conchas ricas en calcio (*rojo*) de los organismos marinos que habitan las aguas cálidas. (Las conchas de los sedimentos oscuros provenían de especies de aguas frías.) La brusca puesta en marcha del mecanismo de cinta transportadora atlántica debió haber calentado la superficie, eliminando los témpanos y alterando la ecología.

La intuición de Boyle demostró ser correcta cuando él mismo halló que los foraminíferos del océano actual incorporan cadmio en proporción constante a su abundancia en el agua del mar. Midió entonces el cadmio en los testigos de sedimentos. El resultado fue emocionante: una característica clave de la circulación del Atlántico en nuestros días faltaba en la época glacial, hasta hace 14.000 años. Las aguas profundas de nuestro Atlántico contienen sólo alrededor de la mitad de fosfatos y nitratos que las aguas profundas de los océanos Pacífico e Indico. El bajo contenido de nutrientes revela el recorrido reciente del agua cerca de la superficie (donde la actividad biológica la empobrece en nutrientes). Cada invierno, a la latitud aproximada de Islandia, asciende agua de salinidad relativamente alta que se mueve hacia el Norte a profundidades intermedias (tal vez a 800 metros), al empujar lateralmente el viento a las aguas superficiales. Expuesta al aire frío, el agua libera calor, enfriándose desde 10 grados C hasta dos grados. La alta salinidad del agua, junto con el bajón de temperatura, le confiere una densidad insólita y se hunde de nuevo, esta vez hasta el fondo del océano.

La formación de agua profunda del Atlántico Norte desprende una enorme cantidad de calor: representa un 30 por ciento de la energía solar recibida anualmente en la superficie del Atlántico Norte. Este calor adicional explica los inviernos sorprendentemente templados de Europa occidental. (El calentamiento se atribuye, con frecuencia y de manera equivocada, a la corriente del Golfo, que termina mucho más al Sur.) La magnitud de la circulación vertical es también ingente, pues su caudal es 20 veces mayor que la suma de todos los ríos del mundo. De hecho, gran parte de las aguas profundas de los demás océanos del mundo proviene en último término de aquí. Desde su fuente, el agua fluye por las profundidades del Atlántico, dobla el cabo de Buena Esperanza y se une a la corriente abisal que rodea la Antártida y distribuye el agua profunda a los demás océanos.

A medida que las aguas profundas envejecen y se alejan de su lugar de formación, van recogiendo los fosfatos y nitratos que caen, lo que da por resultado un gradiente de niveles cre-



7. DESVIO DE AGUA DULCE procedente de la fusión de los hielos durante la retirada de la capa de hielo norteamericana hace 11.000 años; ese fenómeno podría explicar el período frío de 1000 años de duración conocido como Joven Dryas. El lago Agassiz, alimentado por agua de fusión, había estado vertiendo en el Golfo de México a través del río Mississippi. Sin embargo, cuando la retirada de los hielos abrió un canal hacia el Este, el agua fluyó inundando la región de los Grandes Lagos hasta el río San Lorenzo (*flecha*). La entrada de agua dulce en el Atlántico Norte diluyó la salinidad del agua superficial, rebajando su densidad e impidiendo que se hundiera. El mecanismo de cinta transportadora atlántica quedó inutilizado: el agua caliente ya no podía fluir hacia el Norte, y una amplia región alrededor del Atlántico Norte se enfrió entonces (*región sombreada*).

cientes de nutrientes. Midiendo el contenido de cadmio en foraminíferos que vivieron cerca del fondo, Boyle descubrió que, durante la época glacial, los nutrientes mostraban una distribución más uniforme con la profundidad en todos los océanos del mundo. Además, la concentración en el Atlántico glacial era máxima en las partes más profundas, y no en las intermedias como ocurre hoy.

Estas conclusiones confirmaban las implicaciones de investigaciones anteriores sobre microfósiles. La "cinta transportadora" atlántica, que libera enormes cantidades de calor en el Atlántico Norte y envía inmensos volúmenes de agua al abismo, estuvo fuera de servicio hasta que terminó el último período glacial, hace 14.000 años. En ausencia de este componente crucial, la circulación oceánica mundial ofreció un aspecto muy distinto del que hoy presenta.

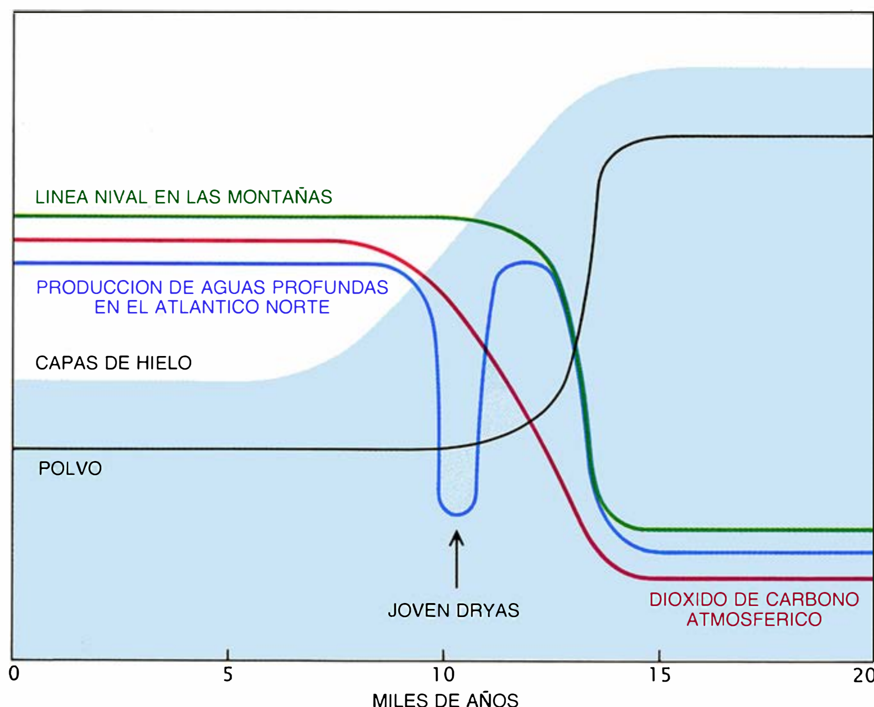
Las pruebas, oceánicas y continentales, apuntan a un cambio simultáneo del comportamiento de los océanos y la atmósfera hace 14.000 años. La configuración de la circulación oceánica cambió drásticamente; en ambos hemisferios, los glaciares comenzaron a retirarse, augurando un calentamiento global; y el contenido en dióxido de carbono de la atmósfera inició su ascenso hasta niveles interglaciales. Creemos que todos esos sucesos indican una importante reorganización del sistema conjunto atmósfera-océano: un salto del comportamiento glacial al interglacial. La verdad es que pensamos que los saltos bruscos de un comportamiento a otro pueden ser la causa fundamental de los ciclos glaciales en general.

Para nosotros, los cambios de estacionalidad constituyen la causa última de esas alteraciones de comportamiento. Aunque no podemos sugerir mecanismos sencillos que relacionen la estacionalidad, el sistema océano-atmósfera y el clima global, sí podemos ofrecer algunas ideas.

La atmósfera, que sufriría los cambios de estacionalidad, influye de manera poderosa en la circulación de los océanos. El acoplamiento guarda relación con la distribución de salinidad. Los vientos dominantes transportan agua evaporada de una parte del océano a otra región, donde cae en forma de precipitación. El transporte de vapor deja su impronta: aumenta la salinidad en la primera región y la diluye en la segunda.

Ahora bien, la tendencia de las aguas superficiales a hundirse en las profundidades y propiciar un mecanismo de cinta transportadora vertical, como el del Atlántico Norte, depende de sus densidades. La densidad refleja tanto la temperatura como la salinidad, pero esta ultima es el factor decisivo. (El agua superficial se enfría hasta llegar casi al punto de congelación en todas las altas latitudes en invierno, si bien sólo la anormalmente salina se hunde en el abismo.) El sistema tiene de por sí un carácter no lineal: un cambio gradual en la circulación atmosférica, que alterase la salinidad en regiones tales como el Atlántico Norte, podría transformar radicalmente la configuración de la circulación global. De hecho, el mecanismo de transporte atlántico parece ser el elemento más vulnerable del sistema, lo que puede explicar por qué la estacionalidad del hemisferio Norte rige los cambios climáticos globales.

Un acontecimiento climático llamado Joven Dryas, que tuvo lugar varios miles de años después de que los glaciares iniciasen su retirada, aporta una prueba fehaciente en favor de esta parte de la teoría que proponemos. Ilustra vívidamente la ligazón entre el transporte de agua dulce —en



8. EL FINAL DE LA ULTIMA EDAD GLACIAL trajo consigo cambios globales, resumidos aquí. Empezaron al mismo tiempo (hace unos 14.000 años), aun cuando su ritmo fue diferente. La circulación del Atlántico Norte saltó bruscamente de las condiciones glaciales a las interglaciales (con una breve recaída durante el período frío del Joven Dryas), al reanudarse la producción de agua profunda. Disminuyó la cantidad de polvo en la atmósfera y comenzó a aumentar la concentración de CO_2. Las variaciones formarían parte de una reorganización más drástica del océano y la atmósfera, que calentó el planeta e hizo que los glaciares de montaña y las capas de hielo se retiraran.

este caso, agua líquida y no vapor— y la circulación oceánica. Hace unos 11.000 años, la retirada de los glaciares estaba bastante avanzada y las temperaturas habían subido hasta niveles interglaciales. De repente, en sólo 100 años, Europa septentrional y el noroeste de América retornaron a las condiciones glaciales. El polen recogido muestra que los bosques que habían tomado posesión de la Europa postglacial dieron paso a pastos y arbustos árticos, entre ellos la flor dryas (que presta su nombre al período), y el testigo de hielo de Groenlandia registra un enfriamiento local de unos 6 grados Celsius. Unos 1000 años más tarde, este período frío terminó de forma brusca: en sólo 20 años, según sugiere el reciente trabajo de Willi Dansgaard, de la Universidad de Copenhague.

Las mediciones de cadmio tomadas por Boyle, junto con el registro de foraminíferos de aguas superficiales en el Atlántico Norte, explican lo que ocurrió. Ambos indicadores retornan a los valores glaciales al comienzo del Joven Dryas. La cinta transportadora había dejado de funcionar otra vez. Se había detenido la formación de aguas profundas, con lo que el agua caliente de las profundidades intermedias que suministra a Europa el aporte adicional de calor no podía ya fluir hacia el Norte. El período frío que azotó la zona sólo cesó cuando la cinta transportadora volvió a ponerse en marcha, 1000 años después.

Una inmensa entrada de agua dulce procedente de las masas de hielo norteamericanas en fusión parece haber atrancado el mecanismo transportador, desencadenando con ello el Joven Dryas. La capa de hielo comenzó a retirarse hace 14.000 años; durante los 7000 que tardó en fundirse, debió liberar agua dulce aproximadamente al mismo ritmo que el actual del río Amazonas. Al principio, casi toda el agua fundida del borde meridional de la inmensa capa de hielo fluyó Mississippi abajo hacia el Golfo de México. No obstante, hace 11.000 años, algún acontecimiento provocó que gran parte del agua de fusión se desviara por el río San Lorenzo hacia el Atlántico.

En la depresión de fondo rocoso al borde de la capa de hielo en retirada, en lo que ahora es Manitoba meridional, el acopio del agua de fusión había dado lugar a un enorme depósito conocido por lago Agassiz. Hasta hace 11.000 años, el lago, mayor que ninguno de los actuales Grandes Lagos, había sobrepasado un reborde rocoso que cerraba el camino del Sur y desaguaba en el río Mississippi. Después, la retirada de los hielos dejó libre un canal hacia el Este. El nivel del agua en el lago Agassiz bajó 40 metros conforme desaguaba a través de la región de los Grandes Lagos hasta el río San Lorenzo.

Los foraminíferos de las aguas superficiales del Golfo de México registran este cambio de dirección. Su contenido en oxígeno 18 había sido anormalmente bajo, en respuesta al agua de fusión rica en oxígeno 16 que fluía por el Mississippi. Hace unos 11.000 años, la relación isotópica aumentó bruscamente, cuando la desviación de la salida del lago Agassiz cortó el aporte de agua de fusión al Golfo.

El agua de fusión, mientras tanto, desembocaba en el Atlántico Norte en las cercanías del lugar de formación de las aguas profundas. Allí redujo la salinidad de las aguas superficiales (y, por consiguiente, su densidad) en tal cuantía que, pese al fuerte enfriamiento invernal, no podían hundirse en el abismo. La cinta transportadora permaneció fuera de uso hasta 1000 años más tarde, cuando un enorme lóbulo de hielo avanzó a través del extremo occidental del lago Superior y cerró, de nuevo, la salida hacia el Este. El lago Agassiz volvió a subir 40 metros, vertiendo otra vez el agua de fusión río Mississsippi abajo. La cinta transportadora oceánica se reactivó y Europa se templó de nuevo.

El Joven Dryas pone en relación el flujo de agua dulce, la circulación oceánica y el clima; pero sólo el clima regional. Alrededor del Atlántico Norte, el episodio provocó un enfriamiento brusco y notable; en los otros lugares, sus efectos fueron débiles o inexistentes. A diferencia de las glaciaciones, el Joven Dryas afectó sólo al transporte de calor (desde las bajas latitudes hasta el Atlántico Norte) y no al clima global. ¿Cómo pudo un cambio de comportamiento del sistema océano-atmósfera durante los períodos glaciales haber enfriado el planeta entero?

Los testigos de hielo de Groenlandia y la Antártida abonan una respuesta parcial. El bajo nivel de dióxido de carbono atmosférico que registran durante la última glaciación debió contribuir al enfriamiento: el dióxido de carbono es un gas de invernadero que calienta la superficie de la tierra aprisionando la energía solar. Las simulaciones informáticas del clima sugieren, sin embargo, que el enfriamiento global causado por el dióxido de carbono habría sido, a lo más, de 2 grados Celsius: menos de la

mitad de lo que se registra en los glaciares de montaña.

Intervinieron también otros dos cambios que registran los testigos de hielo. El aire de la edad del hielo contiene la mitad del nivel postglacial de metano. Este es, asimismo, un gas de invernadero, aunque el enfriamiento del período glacial atribuible a la disminución del metano importaría sólo unas décimas de grado. Además, el polvo abunda, en los hielos del período glacial, unas treinta veces más que en las capas de hielo recientes, lo que confirma lo aportado por otras fuentes, en el sentido de que la atmósfera del período glacial era extremadamente polvorienta. El polvo pudo también haber contribuido al enfriamiento mediante su reflexión de la luz solar. Por desgracia, este efecto es difícil de cuantificar.

El carácter polvoriento y el bajo contenido en metano del aire de la época glacial sugiere que el modo glacial de funcionamiento del sistema océano-atmósfera había impuesto un clima seco. El polvo, después de todo, es arrastrado por el viento desde regiones donde la vegetación es rala, mientras que el metano se produce en los pantanos. El clima seco (registrado asimismo en formas del relieve terrestre de la edad de hielo, las dunas de arena por ejemplo, y en depósitos de polen) habría dejado su impronta en las temperaturas globales. La temperatura baja más deprisa con la altitud en una atmósfera más seca; de aquí que la sequedad pudo haber participado en el descenso de la línea nival de las montañas.

Ahora bien, incluso sumados, los efectos del dióxido de carbono, metano, polvo y sequedad podrían quedar cortos para dar cuenta de la diferencia de temperatura entre el planeta glacial y el interglacial. ¿Qué otro factor pudo haber intervenido? Cabría que la reorganización del océano-atmósfera cambiase las características de las nubes y las tornara más reflectoras.

Reconocemos que nuestra explicación del modo en que los cambios en el comportamiento del sistema océano-atmósfera enfriaron el planeta resulta inacabada. Además, puesto que apelamos a la estacionalidad del hemisferio Norte para regular esos cambios de comportamiento, topamos con la misma dificultad con que otros teóricos se las vieron: ¿por qué es el ciclo astronómico de 100.000 años el dominante, cuando se trata del más débil de los tres? Tal vez el crecimiento de las masas de hielo ejerce un efecto de realimentación sobre la circulación atmosférica. El sistema océano-atmósfera podría volverse sumamente susceptible a un cambio de comportamiento en cuanto las masas de hielo hubieran alcanzado un tamaño crítico, cosa que podría tardar 100.000 años en suceder.

Pese a ello, muchas indicaciones recientes apoyan nuestra propuesta básica: las transiciones entre las condiciones glacial e interglacial representan saltos entre dos modos de comportamiento, estables pero muy diferentes, del sistema océano-atmósfera. Si el sistema climático terrestre salta entre estados discontinuos, como los electrones alrededor del átomo, todos los indicadores climáticos deberán registrar una transición simultáneamente. A este respecto, las indicaciones desde el final del último período glacial son de lo más impresionante. El calentamiento de las aguas superficiales del Atlántico Norte, el inicio de la fusión de las masas de hielo septentrionales y de los glaciares de montaña en los Andes, la reaparición de los árboles en Europa y los cambios en la ecología del plancton en la vecindad de la Antártida y en el mar Meridional de la China, tuvieron lugar todos ellos entre 14.000 y 13.000 años atrás.

Si se comprueba que el sistema climático global presenta estados cuánticos (discontinuos), los climatólogos habrán adquirido una nueva perspectiva sobre la regulación astronómica, que, actuando principalmente en las altas latitudes septentrionales, podría alterar el clima mundial. Tendrán también un nuevo motivo del que preocuparse acerca del clima futuro. De igual manera que hace 14.000 años la Tierra estaba sujeta al efecto gradual de veranos septentrionales más acusados, se halla ahora sometida a un impulso gradual, conforme la actividad humana lanza, en cantidades crecientes, dióxido de carbono y otros gases de invernadero a la atmósfera. ¿Responderá de nuevo bruscamente el sistema climático, saltando a un comportamiento del todo nuevo?

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EL OCÉANO. Wallace S. Broecker en *Investigación y Ciencia*, n.º 86; págs. 90-101; noviembre de 1983.

ICE AGES: SOLVING THE MYSTERY. John Imbrie y Katherine O. Imbrie. Harvard University Press, 1986.

THE ROLE OF OCEAN-ATMOSPHERE REORGANIZATIONS IN GLACIAL CYCLES. Wallace S. Broecker y George H. Denton en *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 53, n.º 10, págs. 2465-2501; octubre de 1989.

La quiralidad del universo

Desde los átomos hasta los seres humanos, la naturaleza es asimétrica en lo atinente a la quiralidad, u orientación correspondiente a una u otra mano. Aparecen ya indicios que conectan la quiralidad en distintos dominios

Roger A. Hegstrom y Dilip K. Kondepudi

En 1848, al examinar Louis Pasteur cierta sal de ácido tartárico al microscopio, observó que la sal formaba cristales de dos tipos, cada uno de los cuales sería imagen del otro por reflexión en un espejo. Separó los cristales de uno y otro tipo, los disolvió en agua, formó sendas disoluciones e hizo pasar un haz de luz a través de cada una de ellas. Para gran sorpresa suya, una de las disoluciones hacía girar en sentido horario (dextrógiro) a la luz polarizada, mientras que la otra la hacía girar en sentido antihorario (levógiro).

Este precioso descubrimiento, realizado a la edad de 25 años, llevó a Pasteur a desarrollar una teoría de la estructura molecular. Poco se sabía, por entonces, sobre la estructura de la materia a tan pequeña escala; Pasteur postuló que las dos formas distintas de los cristales de tartrato, y su propiedad de hacer girar el plano de polarización en distinto sentido, se debían a que las moléculas componentes de la sal eran, a su vez, de dos tipos: dextrógiro el uno y levógiro el otro.

Sus investigaciones en esta dirección pavimentaron el camino para otro notable descubrimiento, efectuado en 1857. Un día, Pasteur descubrió que, en un platillo que contenía una disolución ópticamente inactiva, que no hacía girar el plano de polarización de la luz, habían crecido mohos. En lugar de limitarse a tirar como desecho la disolución "contaminada" —que hubiera sido lo normal—, Pasteur examinó su efecto sobre un haz de luz. ¡La solución contaminada hacía girar la luz! Los microorganismos habían alterado una disolución ópticamente inactiva, transformándola en otra activa.

Basándose en su teoría molecular, Pasteur razonó que la disolución original era ópticamente inactiva porque contenía igual número de moléculas dextrógiras y levógiras. Los hongos habían reaccionado químicamente tan sólo con uno de los tipos, dejando en la disolución un cantidad relativamente grande del otro. Tal desequilibrio transformó la disolución, haciéndola ópticamente activa.

Así fue como Pasteur comprendió que la química de la vida tenía una lateralidad preferida. Llegó a considerar que tal lateralidad establecía una de las más claras diferencias entre materia viva y materia inerte, y acabó proclamando que constituía un hecho profundo de la naturaleza, un hecho que trascendía, con mucho, la química de la vida. "La vida, cual se nos manifiesta —escribió Pasteur—, es una función de la asimetría del universo y de las consecuencias de tal hecho." Posteriormente, ante la Academia Francesa de Ciencias, formularía la grandiosa conjetura: "L'univers est dissymétrique".

La conjetura de Pasteur ha resultado ser verdadera hasta un punto que nadie imaginaba; seguramente, ni él mismo. La ciencia moderna ha revelado que la "simetría especular", la simetría respecto a un plano, la que presentan una figura y su imagen en el espejo, suele faltar en la naturaleza: el universo es "dissymétrique" en todos los niveles, desde los subatómicos hasta los macroscópicos. Son muchas las preguntas relativas a los orígenes de esta asimetría que siguen sin tener respuesta, a pesar de que en estos últimos decenios se ha conseguido cierta comprensión de por qué la lateralidad de un nivel puede suscitar la lateralidad de otro. Para describir lo sabido y lo ignorado, resulta conveniente empezar por la escala de los objetos ordinarios.

Asimetría quiral

La mayoría de los objetos que hallamos en la naturaleza no exhiben simetría respecto a un plano, diciéndose, por ello, que poseen lateralidad o quiralidad. Para distinguir ambas formas del objeto, se habla de forma levógira y forma dextrógira. En el caso de ciertas entidades quirales con las que estamos familiarizados, como las manos o los tornillos, por citar dos ejemplos, la distinción entre los lados derecho e izquierdo, o entre tornillos "a derechas" y "a izquierdas", resulta bastante clara; pero en el caso de objetos como un olmo frondoso, o de cosas de forma irregular, la denominación es un tanto arbitraria. Cuando ciertos objetos muy sencillos, pensemos en una esfera o un triángulo equilátero, se reflejan en un espejo, la imagen resultante es indistinguible de la del objeto original. Los objetos que son idénticos a sus imágenes especulares reciben el nombre de aquirales.

No sólo los objetos exhiben quiralidad: también pueden manifestarla ciertos procesos; por ejemplo, ciertas reacciones químicas. Determinadas interacciones atómicas o nucleares exhiben preferencia por la izquierda o la derecha. Si todos los procesos fuesen quiralmente simétricos, observaríamos en el mundo real un mismo número de sistemas "reflejados en un espejo" que manifestarían preferencias contrarias. El hecho de que no sea así prueba la asimetría de ciertos procesos naturales.

ROGER A. HEGSTROM y DILIP K. KONDEPUDI trabajan en el departamento de química de la Universidad Wake Forest. Hegstrom inició su formación en St. Olaf College, donde se graduó en 1963. Se doctoró por Harvard en 1968. Su investigación teórica se ha centrado en los efectos de las interacciones electromagnética y débil en átomos y moléculas. Kondepudi se graduó en ciencias en la Universidad de Madrás en 1971, realizó estudios de segundo ciclo en el Instituto Indio de Tecnología de Bombay y se doctoró en el centro de mecánica estadística de la Universidad de Texas en Austin en 1979. Su interés por los orígenes del orden y de la complejidad le han llevado a través de la física, la química y la biología.

A pesar de que un objeto quiral y su imagen especular son obviamente diferentes, no existe, a priori, una razón por la que uno haya de ser superior al otro. Empero, el mundo real sí expresa, de ordinario, preferencia por una clase de quiralidad. Hecho que es llamativamente manifiesto en el caso de los orgánismos vivos. Los humanos, pongamos por caso, somos estructuralmente quirales. Tenemos el corazón desplazado hacia la izquierda; el hígado, hacia la derecha. Las personas mostramos, asimismo, quiralidad funcional. Por ejemplo, aunque no parece haber ventaja intrínseca en el uso especializado de la mano derecha o la izquierda, son muy pocas las personas ambidextras. ¿Cuál es la causa de que los individuos prefieran, por lo general, usar más una mano que la otra? Muchas son las razones que podemos postular, pero lo más probable es que la correcta no se conozca todavía.

Dado que los humanos no solemos ser ambidextros, la cuestión inmediata es la de por qué es diestra la mayoría de la gente. La dominancia de la mano derecha sobre la izquierda es universal e independiente de la raza o la cultura. No parecen existir desventajas evidentes en el hecho de que la mayoría de las personas fueran zurdas; el que sean mayoría las diestras no parece ser más que un accidente. Podríamos preguntarnos, asimismo, por qué no nacen iguales números de diestros y zurdos. Lo mismo que antes, se ignora la respuesta, pero resulta plausible que se trate de un rasgo hereditario: en cuanto la destreza, por una razón cualquiera, prevaleció sobre la zurdería, permaneció así. Existen en los organismos otros ejemplos de asimetría quiral, aunque no tan prominentes. Las conchas helicoidales de las caracolas pueden girar bien como un tornillo de avance dextrógiro o bien como otro levógiro. Las caracolas predominantes son dextrógiras, lo mismo al norte que al sur del Ecuador. En estos animales, dominados por la dextralidad, la existencia de individuos levógiros se debe a mutaciones, cuya frecuencia de aparición oscila desde uno en varios centenares hasta uno en millones, dependiendo de la especie. La "regla de la derecha" no es, empero, universal; ciertas especies, como el buccino de la costa atlántica de los EE. UU., son predominantemente levógiros. Raros son los ejemplos en los que los individuos orientados a derechas y a izquierdas aparecen en números casi iguales; el caracol arbóreo cubano, *Liguus poeyanus*, constituye uno de estos raros ejemplos.

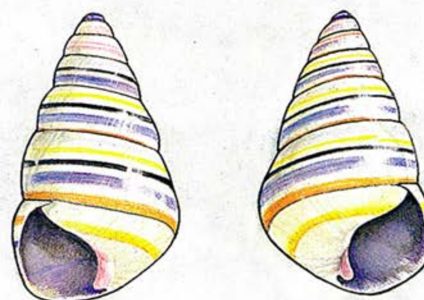
Lo mismo que los animales, la mayoría de las plantas exhiben una quiralidad preferida. La correhuela se arrolla en hélice dextrógira, mientras que la madreselva lo hace como una hélice levógira. La estructura helicoidal en organismos vivos se ha observado también en la diminuta escala de las bacterias. En la Universidad de Arizona, Neil H. Mendelson y sus colaboradores han venido investigando desde 1970 *Bacillus subtilis*, una bacteria que ordinariamente forma colonias espiraladas dextrógiras. ¡Curiosamente, al aumentar la temperatura, la espiral se torna levógira!

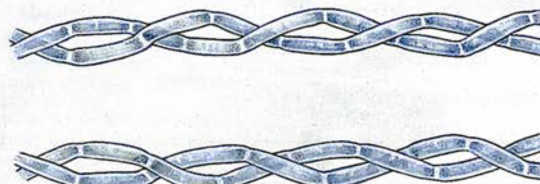
Quiralidad en las moléculas

Como descubrió Pasteur, también las moléculas pueden ser quirales. Los químicos denominan L-enantiómeras y D-enantiómeras a las moléculas que son una de otra imagen reflejada en el espejo; la L y la D corresponden a los prefijos levo (izquierda) y dextro (derecha), y son reliquia de los estudios de Pasteur sobre la rotación óptica de la luz. Encontramos formas enantiómeras en multitud de sustancias orgánicas e inorgánicas; en esencia, en todas las moléculas cruciales para el desarrollo de vida, y específicamente en las proteínas, que son las responsables de la estructura y regulación química de las células vi-

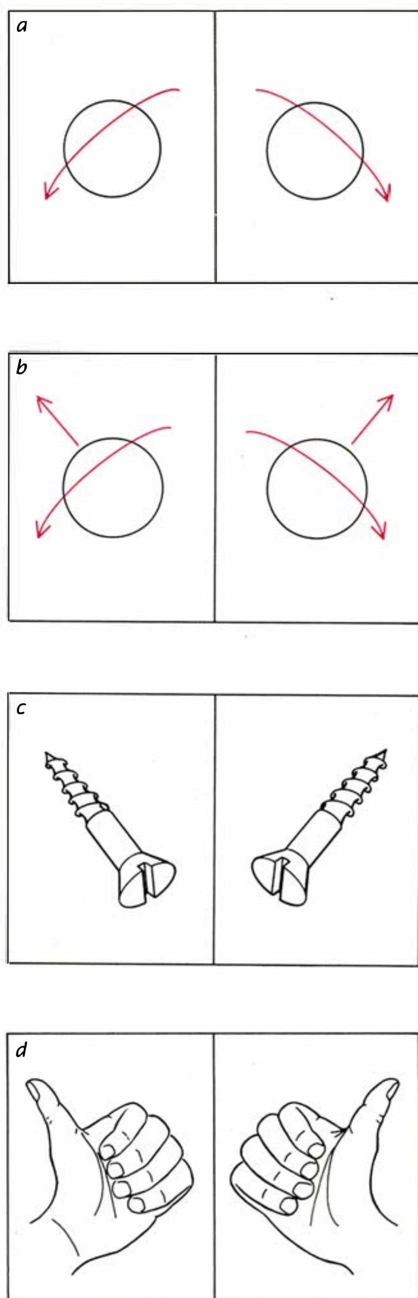








1. PREFERENCIA QUIRAL, un rasgo corriente en los seres vivos. La madreselva *Lonicera sempervirens* se arrolla hacia la izquierda; *Convolvulus arvensis* se arrolla hacia la derecha, lo mismo que la mayoría de las plantas trepadoras. Los caracoles, como el *Liguus virgineus*, son ordinariamente dextrógiros, pero en cierta especie pueden aparecer versiones levógiras producidas por mutaciones. Las colonias de la bacteria *Bacillus subtilis* trazan de ordinario espirales a derechas; al calentarlas, estas colonias pasan a arrollarse a izquierdas. También los átomos y moléculas muestran asimetría con respecto a la derecha y la izquierda, pero tal hecho aún no se ha relacionado plausiblemente con la lateralidad de los organismos.



2. SE MANIFIESTA LA QUIRALIDAD en la diferencia entre la izquierda y la derecha. Los objetos no superponibles sobre sus imágenes en el espejo se denominan "quirales". Una esfera estática es idéntica a su imagen reflejada y, por ello, es aquiral; aunque una esfera se encuentre en rotación (*a*), su imagen reflejada es superponible sobre el objeto original volviéndola cabeza abajo, por lo que una esfera en rotación también es aquiral. Si la esfera se desplaza a lo largo de su eje de rotación (*b*), la imagen reflejada deja de ser superponible sobre la original, y el objeto se convierte en quiral. Por convenio, si un objeto en rotación se comporta como un tornillo que avanza al girar "a derechas", se dice que el objeto es dextrógiro; si se comporta como un tornillo "a izquierdas", se dice que es levógiro (*c*). La dirección del vector de momento angular (o vector de espín) se determina por la regla de la mano derecha: ciérrese ésta con los dedos apuntando en el sentido de rotación; el pulgar señala entonces en la dirección del eje de espín (*d*). (Manos y tornillos son quirales, no superponibles sobre sus imágenes en el espejo.)

vas, y en el ADN, la molécula portadora de información genética.

Una molécula de proteína es un polímero, es decir, una larga cadena de moléculas menores, que en este caso es una cadena de aminoácidos. A pesar de que existen varios centenares de aminoácidos, todas las proteínas están formadas por los mismos 20 aminoácidos. Todos los aminoácidos, menos uno (la glicina), son quirales, y poseen levo- y dextroenantiómeros. Un hecho que resulta bastante extraño y llamativo es que las proteínas estén exclusivamente compuestas por levoaminoácidos. (Existen algunos casos de polipéptidos −cadenas breves de aminoácidos− que contienen dextroaminoácidos y desempeñan papeles biológicos especializados, pero son muy raros.)

La función principal de ciertas proteínas, llamadas enzimas, consiste en catalizar reacciones biomoleculares, entre ellas, la síntesis de otras proteínas. La capacidad catalítica de las enzimas depende crucialmente de su estructura tridimensional, la cual depende, a su vez, de la secuencia de sus levoaminoácidos. Las cadenas sintéticas de aminoácidos formados por levo- y dextroenantiómeros no se retuercen en la forma requerida para una eficiente actividad catalizadora; no pueden formar la estructura regular de arrollamiento conocida por hélice alfa, presente en casi todas las enzimas.

En razón de la quiralidad de sus moléculas clave, la química de la fisiología humana ofrece una elevada sensibilidad a las diferencias enantioméricas. Un ejemplo extremo salió a la luz en 1963, cuando la talidomida indujo horribles defectos de nacimiento. Los defectos se debieron al hecho de que, mientras uno de los enantiómeros de este compuesto quiral eliminaba las náuseas matinales de las embarazadas, el otro provocaba defectos de nacimiento. La industria farmacéutica de nuestros días presta cuidadosa atención a la separación de enantiómeros. Un caso menos mórbido de sensibilidad humana a los enantiómeros lo ofrece el limoneno, compuesto que encontramos en limones, naranjas y perfumes. En este caso podemos oler la diferencia: uno de los enantiómeros huele a limón; el otro, a naranja.

Al igual que las proteínas, los ácidos nucleicos ADN y ARN son polímeros que existen en la naturaleza con sólo una quiralidad. Uno y otro están compuestos por cuatro tipos de subunidades, cada una de las cuales contiene un grupo azucarado quiral (la ribosa). En los ácidos nucleicos, tan sólo se halla presente el dextroenantiómero de ese azúcar. De ordinario, el ADN y el ARN forman hélices dextrógiras, a consecuencia de la presencia exclusiva de dextrosacáridos. La adecuada replicación de los ácidos nucleicos depende de la actividad de proteínas compuestas por levoaminoácidos; por este motivo, las quiralidades relativas de proteínas y ácidos nucleicos están íntimamente conectadas.

La gran preferencia que la química de la vida exhibe por levoaminoácidos y dextrosacáridos sobre sus imágenes simétricas resulta peculiar por dos razones. Primera, exceptuadas pequeñas diferencias que luego comentaremos, las propiedades químicas de los enantiómeros levo y dextro son esencialmente simétricas. Segundo, cuando en el laboratorio se sintetizan moléculas quirales a partir de bloques elementales aquirales, se producen iguales cantidades de los dos enantiómeros, a menos que se tomen las más cuidadosas precauciones para introducir un agente asimétrico durante la síntesis.

Subyace a esta simetría una razón fundamental: las reacciones químicas son esencialmente resultado de las interacciones electromagnéticas entre átomos. La fuerza electromagnética se comporta de modo tal que, si tiene lugar un proceso dado, la imagen especular de tal proceso se produce con la misma probabilidad. Se dice que una fuerza conserva la paridad si las probabilidades con que origina un proceso y su simétrico son iguales. Dado que la fuerza electromagnética conserva la paridad, sería de esperar que el mundo estuviera habitado por números iguales de levo- y dextroenantiómeros. ¿Por qué no es así? Volveremos a esta cuestión tras haber examinado la quiralidad a escala subnuclear.

Cuatro fuerzas

Todas las partículas elementales conocidas interactúan unas con otras por medio de fuerzas de cuatro tipos: la gravitación, la fuerza electromagnética (responsable de las reacciones químicas ordinarias), la fuerza nuclear fuerte (encargada de mantener los núcleos atómicos) y la fuerza nuclear débil, menos conocida. Hasta 1957, se creía que la naturaleza era quiralmente simétrica a la escala de las partículas elementales; vale decir, que las cuatro fuerzas conservaban la paridad. Fue en ese año cuando se descubrió que la fuerza nuclear débil no conservaba la paridad.

Como su nombre da a entender, la

fuerza débil es relativamente endeble, unas 1000 veces menos vigorosa que la fuerza electromagnética, y 100.000 menos que la fuerza nuclear fuerte. El efecto más familiar gobernado por la fuerza fuerte consiste en la producción de rayos beta en la desintegración radiactiva. En realidad, los rayos beta son electrones de alta energía más sus gemelos de antimateria, los positrones. Estas partículas poseen un momento de rotación ("espín") intrínseco y, por tanto, cuando se desplazan a lo largo de su eje de rotación, ya en el sentido del vector de espín, ya en el contrario, pueden clasificarse como dextrógiros o levógiros. El sorprendente y hoy famoso descubrimiento de la violación de la paridad, realizado en 1957 por Chien-Shiung Wu y sus colegas, de la Universidad de Columbia, llevó al reconocimiento de que las partículas beta emitidas por los núcleos radiactivos poseían asimetría quiral definida: los electrones levógiros emitidos superaban con mucho a los dextrógiros.

Las investigaciones posteriores sobre la desintegración beta condujeron al descubrimiento del neutrino y del antineutrino, partículas eléctricamente neutras que se emiten también durante la desintegración beta y que viajan siempre a la velocidad de la luz. Al igual que el electrón, el antineutrino emitido por la materia radiactiva posee espín; a diferencia del electrón, el neutrino existe solamente en versión dextrógira. Nadie sabe por qué existe asimetría quiral en un nivel tan fundamental. La antimateria radiactiva emite un exceso de positrones dextrógiros (antielectrones) y exclusivamente neutrinos levógiros. Al parecer, no existen en el universo neutrinos dextrógiros y antineutrinos levógiros.

A lo largo del decenio siguiente se creyó que la no conservación de la paridad estaría confinada a las reacciones nucleares. Los fenómenos que dependen de la fuerza electromagnética, como las reacciones químicas o las interacciones entre los átomos y la luz, parecían conservar la paridad. Empero, a finales del decenio de 1960, Steven Weinberg, que actualmente se encuentra en la Universidad de Texas en Austin, Abdus Salam, del Centro Internacional de Física Teórica en Trieste, y Sheldon L. Glashow, de la Universidad de Harvard, desarrollaron una teoría que unificaba las fuerzas débil y electromagnética. La teoría de estos científicos pronosticaba la existencia de una nueva "fuerza electrodébil" entre los electrones de un átomo y los protones y neutrones de su núcleo. La existencia de tal fuerza, que no conservaba la paridad, quedó confirmada experimentalmente en el decenio de 1970.

A causa de que la fuerza electrodébil distingue entre derecha e izquierda, los átomos y moléculas tenidos hasta entonces por aquirales tienen que ser quirales. Además, los enantiómeros como los levo- y dextroaminoácidos deben diferenciarse en lo atinente a aquellas propiedades físicas que, como la energía, dependan de su quiralidad.

Resulta hoy evidente que el mundo es quiralmente asimétrico en todas las escalas, desde la escala de las partí-

CARACOLAS HELICOIDALES		
PLANTAS HELICOIDALES		
BACTERIAS HELICOIDALES		
PROTEINAS Y ADN	MUY RARAS EN LA NATURALEZA	
AMINOACIDOS	R C NH_2 H COOH	R C HOOC H NH_2
CORRIENTES QUIRALES INTRA-ATOMICAS	NO HALLADAS EN LA NATURALEZA	+
NEUTRINO HELICOIDAL		NO HALLADO EN LA NATURALEZA

3. PREFERENCIA entre izquierda y derecha. Se manifiesta en muchos niveles de la naturaleza. Los recuadros sombreados indican cuál es la quiralidad preferida. La mayoría de las caracolas marinas helicoidales son dextrógiras, pero existen también especies levógiras, así como individuos mutantes. Las plantas trepadoras son asimismo predominantemente dextrógiras. Las bacterias helicoidales se dan en variedades dextro- y levógiras. De ordinario, las proteínas y el ADN se arrollan en hélices a derechas; las versiones a izquierdas son raras y, en la naturaleza, no se dan auténticas versiones especulares. A consecuencia de la fuerza nuclear débil, que es asimétrica, las moléculas de aminoácidos de una y otra quiralidad poseen distintos niveles de energía; las que aparecen en los organismos vivos son casi siempre levógiras. La fuerza débil afecta también a la forma en que los electrones describen sus órbitas en torno al núcleo, y provoca, por tanto, que la mayoría de los átomos se conviertan en dextrógiros. El neutrino existe exclusivamente en la variedad "levógira": el vector de espín de esta partícula elemental apunta en sentido contrario a la dirección de movimiento.

culas elementales hacia arriba. ¿De dónde nacen las asimetrías? ¿Están ligadas las de un nivel con las de otros niveles, o son independientes? Nos esforzaremos por responder a tales cuestiones, en la medida en que ello sea posible, partiendo de la escala de las partículas elementales.

Quiralidad de las partículas elementales

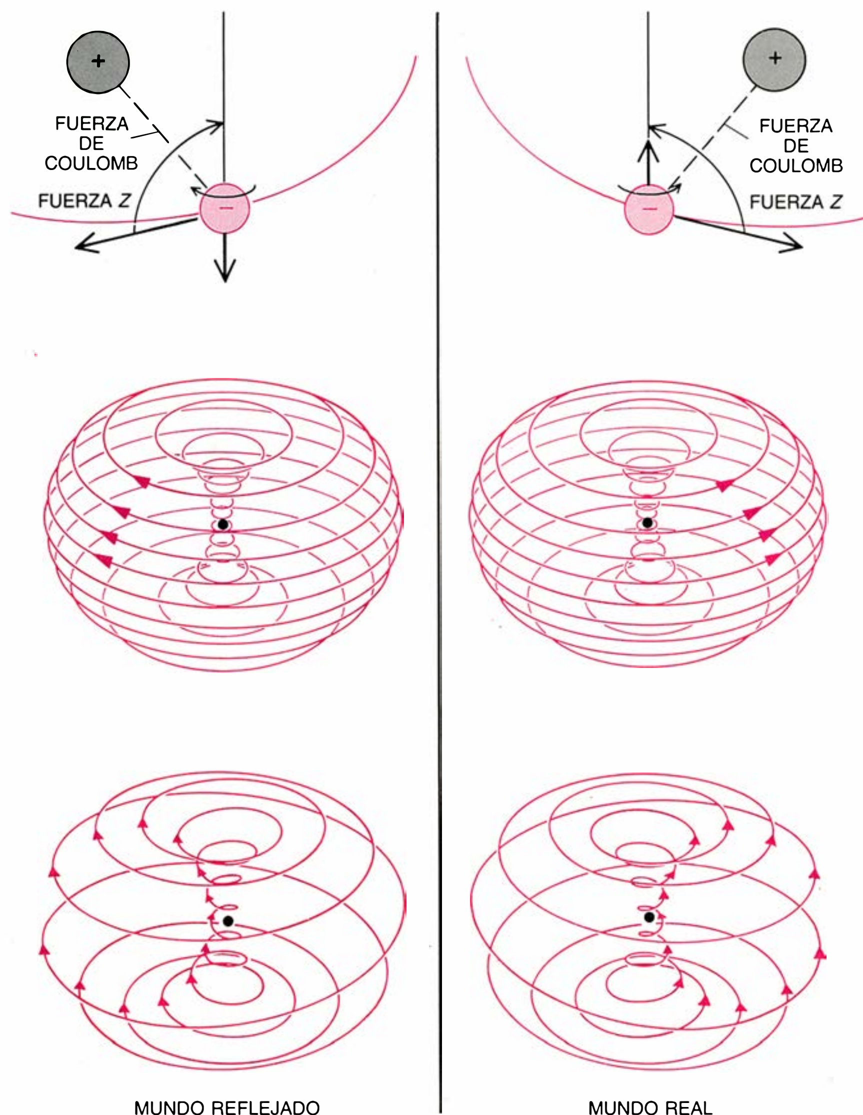
En reposo, una partícula elemental como un electrón o un positrón es esféricamente simétrica y, por tanto, aquiral. Pero si una partícula en rotación sobre sí misma se mueve en uno u otro sentido a lo largo de su eje de rotación, se convierte en quiral. Si se comporta como un tornillo normal, que avanza cuando gira "a derechas", se dice que la partícula es dextrógira; si se comporta como un tornillo de avance "a izquierdas", es levógira.

La asimetría quiral de los niveles subatómicos está fundamentalmente conectada con la no conservación de la paridad. De acuerdo con el modelo estándar de las partículas elementales, propugnado por Weinberg, Salam y Glashow, la fuerza electrodébil distingue derecha e izquierda mediante "corrientes de carga débil" y "corrientes neutras débiles". La intensidad de tales corrientes —denominadas fuerzas W y Z— entre dos partículas elementales depende de la distancia entre las partículas, así como de sus "cargas".

Estamos utilizando aquí el término "carga" por analogía con la electricidad. El electrón posee carga eléctrica negativa, y la fuerza eléctrica entre dos electrones es de repulsión. En contraste, la carga débil W de un electrón "levógiro" es no nula, siendo nula, en cambio, la de un electrón "dextrógiro". Por tanto, los electrones dextrógiros, simple y llanamente, no "sienten" la fuerza W. Esta propiedad es tenida hoy por propiedad fundamental de la fuerza débil; por el momento, no se dispone de comprensión más profunda de la misma. Una consecuencia de esta asimetría es que la descomposición nuclear beta, gobernada por la fuerza W, produce mayoritariamente electrones levógiros.

Por lo que a la fuerza Z se refiere, los dextro- y los levoelectrones poseen cargas Z de signos opuestos y de magnitudes aproximadamente iguales. La diferencia de signo es responsable de que los electrones dextrógiros sean atraídos hacia el núcleo por la fuerza Z, mientras que los levógiros son repelidos. (Estos enunciados relativos a las cargas Z y W sólo son estrictamente válidos cuando los electrones poseen altísimas energías y viajan a velocidades próximas a las de la luz. No obstante, las ideas explicadas resultan útiles para comprender las asimetrías quirales de los electrones a energías bajas.)

En el mundo situado "del otro lado del espejo", la desintegración beta produciría electrones dextrógiros, y la fuerza Z atraería hacia el núcleo a los electrones levógiros. Sin embargo, estos procesos no se observan en el mundo real, lo que es otra manera de enunciar que la fuerza débil es quiralmente asimétrica, y que la paridad no se conserva.



4. ADQUISICION DE QUIRALIDAD DE LOS ATOMOS gracias a la fuerza nuclear débil Z. En el ángulo superior derecho, vemos un electrón con espín "arriba" en órbita en torno a un núcleo; su imagen reflejada se encuentra en el ángulo superior izquierdo. A falta de la fuerza Z, las sendas del flujo electrónico se parecerían a las de los dibujos centrales. El núcleo ocupa el centro de simetría de cada átomo. Si volvemos del revés la imagen reflejada, las nuevas trayectorias electrónicas son superponibles sobre las primitivas, por lo que tales sendas son aquirales. La presencia de la fuerza Z determina que la dirección del movimiento del electrón tienda a alinearse con la dirección de su espín. Vemos el resultado abajo a la derecha. Ahora, las trayectorias son quirales: los electrones viajan en sentido ascendente a lo largo de la hélice interior, dextrógira, y descienden por la exterior, levógira. El átomo imagen, que vemos abajo, a la izquierda, no existe en el mundo real. En esta composición gráfica hemos ampliado el efecto ejercido por la fuerza Z en un factor de 10^{10}.

Atomos y moléculas

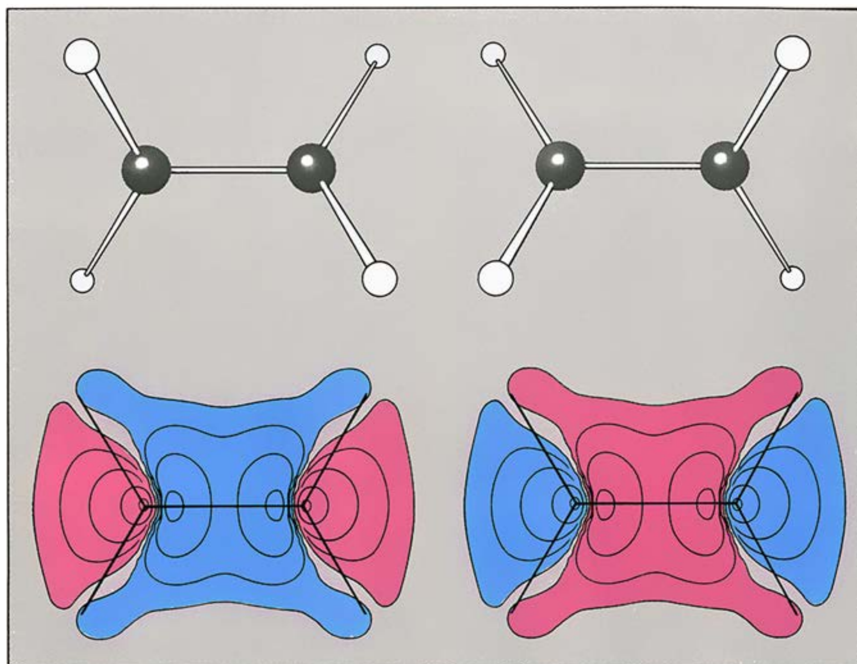
Una consecuencia importante de la fuerza débil Z entre electrones y núcleos es que todos los átomos son quirales. A causa de la fuerza Z, cuando un electrón se encuentra próximo al núcleo, su dirección de movimiento está parcialmente alineada con su eje de espín, confiriéndole carácter dextrógiro [*véase la figura 4*]. Esto significa que la órbita del electrón que, de no existir la fuerza Z, sería circular, se convierte en una hélice dextrógira en la vecindad del núcleo. Porque la interacción responsable del movimiento helicoidal no conserva la

paridad, no existe en la naturaleza la imagen especular de un átomo con flujo electrónico helicoidal levógiro.

Ante la tenuísima intensidad de la fuerza débil, se podría esperar que este movimiento helicoidal fuera imposible de medir. Por ejemplo, el modelo estándar pronostica que, en la situación experimental óptima, la luz que atraviesa un gas atómico debería experimentar escasamente un giro de unos 10^{-5} grados, que es el ángulo subtendido por una mano situada a unos 1000 kilómetros de distancia. Aun así, durante el decenio pasado se ha obtenido respaldo experimental para la quiralidad de los átomos, e incluso se han observado rotaciones del valor pronosticado [véase "Preferencia atómica entre izquierda y derecha", por Marie-Anne Bouchiat y Lionel Pottier; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1984]. Tenemos aquí un ejemplo claro en el que una asimetría quiral que tiene lugar en las partículas elementales *provoca* una asimetría quiral en el nivel superior, atómico.

A escala ligeramente superior, la fuerza *Z* es responsable de que una molécula quiral exista en un estado de energía mayor o menor que el de su enantiómera. La escisión se produce de modo sutil. Supongamos primero modelizada la molécula quiral por una hélice, e imaginemos que la fuerza *Z* ha sido "desactivada". Si un electrón de espín "arriba" se moviera "hacia arriba" por la hélice, tal electrón sería dextrógiro; si un electrón de espín "arriba" se moviera "hélice abajo", el electrón sería levógiro. Desde un punto de vista probabilístico, los números de electrones que se mueven hacia arriba o hacia abajo por la molécula serían iguales; cabría esperar que la quiralidad media de los electrones fuese nula.

Sin embargo, las fuerzas electromagnéticas ordinarias entre los electrones y el núcleo, que conservan la paridad, tienden a alinear el eje de la órbita de cada electrón con su eje de espín, fenómeno conocido por acoplamiento espín-órbita. En el caso de una molécula helicoidal dextrógira, el acoplamiento espín-órbita favorece al movimiento espiral-descendente en el caso de electrones de espín hacia arriba, y el espiral-ascendente para los electrones de espín hacia abajo. En uno y otro caso, el eje de espín del electrón tiende a quedar alineado en sentido contrario a la dirección de movimiento del electrón, por lo que, en una molécula configurada en hélice dextrógira, el acoplamiento espín-órbita produce predominantemente electrones levógiros. En regiones donde la molécula adopta la forma de hélice levógira, predominan los electrones dextrógiros. A resultas de todo ello, las moléculas muestran regiones de diversa quiralidad electrónica [*véase la figura 5*].



5. EL ETILENO tiene una molécula quiral sencilla, compuesta por dos átomos de carbono y cuatro de hidrógeno (C_2H_4). Los dibujos de la parte superior muestran a la derecha y a la izquierda, respectivamente, los dextro- y levoenantiómeros. En el etileno se manifiesta un fenómeno conocido por acoplamiento espín-órbita, que tiende a alinear el espín del electrón en sentido contrario a su momento angular orbital; produce regiones de distinta quiralidad electrónica. Los dibujos de la parte inferior, basados en cálculos de uno de los autores (Hegstrom) y Melinda S. Montgomery, muestran estas regiones vistas desde "lo alto" de la línea que conecta los dos átomos de carbono. La zona sombreada en rojo indica las regiones donde los electrones son dextrógiros; la zona azul, donde son levógiros. La reflexión en el espejo invierte las regiones de quiralidad. La fuerza débil *Z* actúa de forma opuesta sobre los electrones levógiros y dextrógiros, por lo que las dos variantes manifiestan diferencias sutiles: el levoenantiómero del etileno posee menor energía que el dextroenantiómero.

Activemos ahora la fuerza *Z*. Dado que la fuerza *Z* interactúa de distinto modo con los electrones dextrógiros y los levógiros, provoca corrimientos energéticos en las moléculas: la energía de uno de los enantiómeros resulta incrementada, mientras la del otro se decrementa.

La fuerza *Z* es tan pequeña, que sus efectos sobre las propiedades químicas de las moléculas no se han observado. No obstante, Stephen F. Mason y George E. Tranter, del Kings College de Londres, obtuvieron un interesante resultado teórico. Entre 1983 y 1986, realizaron cálculos detallados de las energías de diversos levo- y dextroaminoácidos, tomando en consideración la asimetría de la fuerza *Z*. Surgió la esperada escisión de energía entre los enantiómeros; curiosamente, en todos los casos, el L-enantiómero biológicamente dominante resultó tener menor energía.

Los principios básicos de la mecánica estadística requieren que, en cualquier situación de equilibrio, la forma de menor energía debe ser más abundante que la forma de energía mayor. Mason y Tranter demostraron que los levoaminoácidos deberían superar a los dextroaminoácidos en la proporción de una parte en 10^{17}. Tal infinitesimal diferencia explica por qué los levo- y dextroenantiómeros se encuentran en el laboratorio en número esencialmente idéntico. Empero, no puede uno menos que preguntarse si esta minúscula diferencia, cuya responsable es la fuerza nuclear débil, no estará, en cierta manera, conectada con la dominancia de levoaminoácidos y dextrosacáridos.

La simetría quiral en la vida

Tan poco es lo que sabemos acerca del origen de la vida, que no podemos especular sobre sus causas con algo de confianza. No obstante, desde los primeros experimentos de Stanley L. Miller, de la Universidad de Chicago, en los años cincuenta, los científicos han desarrollado una imagen bastante aceptable de cómo pudieron haber surgido en la Tierra primitiva cierto número de moléculas de importancia biológica. En algún punto de la evo-

lución química que condujo desde los átomos a la vida, hubo de establecerse la asimetría quiral de las biomoléculas.

Lo cual suscita tres cuestiones importantes. ¿De qué modo pudieron surgir moléculas con preferencia quiral a partir de reacciones químicas que son idénticas para ambos enantiómeros? ¿Está ligada la predominancia de los levoaminoácidos y de los dextrosacáridos con la fuerza débil? ¿Fue la asimetría quiral un requisito previo y necesario para la aparición de la vida, o bien la asimetría surgió más tarde, a resultas de la evolución biológica, y no de la evolución química? Iremos analizando estas cuestiones una por una.

Por paradójico que nos resulte, las reacciones químicas simétricas pueden producir cantidades distintas de levo- y dextroaminoácidos, debido a un fenómeno conocido por ruptura espontánea de la simetría. En este contexto, estado simétrico es el que tiene iguales números de formas levo y dextro; en los estados asimétricos, predomina una de ellas. La ruptura espontánea de la simetría constituye un mecanismo en virtud del cual un sistema pasa "espontáneamente" de un estado simétrico a otro asimétrico.

La ruptura espontánea de la simetría se presenta sólo en condiciones físicas específicas. No puede darse en un sistema cerrado al ingreso de energía y materia. Un sistema tal tendería hacia el equilibrio termodinámico, un estado en el cual la concentración de una molécula depende exclusivamente de su energía y su entropía. Debido a que las energías de los enantiómeros levo y dextro son iguales (despreciando la minúscula diferencia energética provocada por la fuerza Z), los números de levo- y dextroenantiómeros serán iguales y, el estado, quiralmente simétrico.

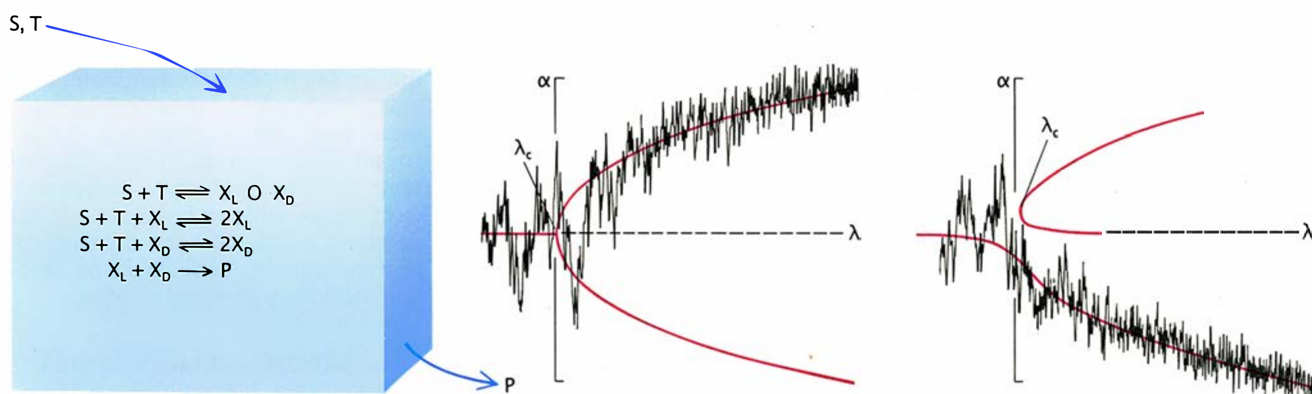
Sin embargo, cuando el sistema está abierto al ingreso de energía y materia, ya no se encuentra en equilibrio termodinámico. La ruptura espontánea de simetría puede, entonces, convertirse en operativa y lanzar al sistema hacia un estado quiralmente asimétrico, hacia un sistema que posea distintas cantidades de los enantiómeros.

En 1953, Sir Frederick Charles Frank, de la Universidad de Bristol, desarrolló un modelo sencillo, destinado a ilustrar de qué forma podría operar espontáneamente la ruptura de simetría en un sistema químico constituido por dos especies moleculares. El modelo de Frank da por supuesto que cada especie es capaz de replicación y que la presencia de una hace disminuir la tasa de crecimiento de la población de la otra; esto es, que las especies se encuentran en competencia. Las tasas de replicación de ambas especies son idénticas, como lo es el efecto de cada una sobre la otra. Sin embargo, en cuanto una especie se hace un poco más numerosa que la otra (por ejemplo, a causa de una fluctuación aleatoria), la más numerosa pasa rápidamente a dominar por completo. El equilibrio simétrico entre los dos tipos de moléculas es inestable, y evoluciona espontáneamente hacia un estado asimétrico en el cual prevalece uno de los dos.

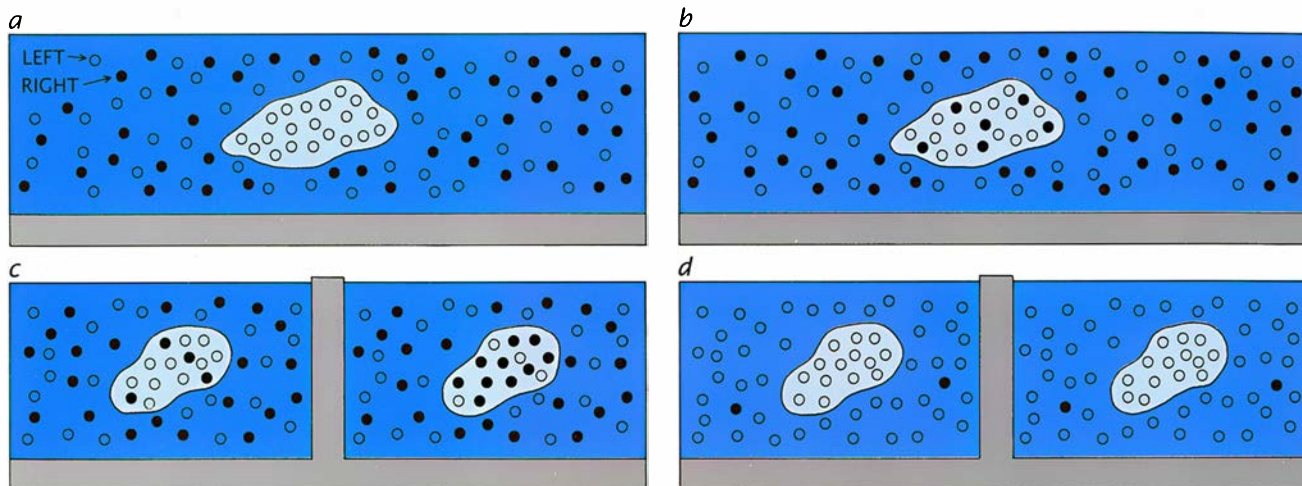
Resulta fácil imaginar cómo funcionaría lo anterior en el nivel biológico. Aun cuando hubiera en algún momento existido sobre la Tierra la imagen especular de la vida cual hoy la conocemos, la competencia entre ambos tipos podría haber tenido por consecuencia la extinción de la imagen "reflejada". El modelo de Frank muestra que esto es también posible a escala molecular, manifestando, en consecuencia, de qué forma podría haber surgido un exceso de levoaminoácidos o dextrosacáridos de un "caldo primordial", en el que inicialmente ambos enantiómeros se encontraban en pie de igualdad.

De nuevo, la fuerza débil

Atenderemos ahora a la segunda cuestión: ¿cabe en lo posible que la fuerza nuclear débil sea responsable de la dominancia de levoaminóacidos y dextrosacáridos? Desde el descubrimiento de la violación de la paridad han sido continuas las tentativas por invocar la desintegración beta y fenómenos afines que pudieran explicar el exceso de un enantiómero. Frederick Vester y Tilo L. V. Ulbricht, que en 1957, cuando se descubrió la violación de la paridad, se encontraban en la Universidad de Yale, hicieron notar que los electrones beta, por ser predominantemente levógiros, emitían, predominantemente tam-



6. AUTOCATALISIS Y RUPTURA DE LA SIMETRIA, expuestas en un sencillo modelo químico. Dos moléculas aquirales, S y T, son bombeadas a un depósito de agua (*izquierda*). Reaccionan y forman la molécula quiral X, en cualquiera de sus formas enantiómeras, X_L y X_D. X puede reaccionar nuevamente con S y T y producir una segunda X_L o X_D; esta autorreplicación se denomina autocatálisis. X_L y X_D pueden también aniquilarse mutuamente y rendir un producto P. Si ninguna de estas reacciones favoreciera al levoenantiómero o al dextroenantiómero, las concentraciones de X_L y X_D habrían de conservarse iguales. Las ecuaciones de la velocidad de reacción muestran, sin embargo, que el equilibrio entre autocatálisis y aniquilación mutua es inestable. El parámetro crítico es lambda (λ), producto de las concentraciones de S y de T. Cuando el valor de λ aumenta hasta superar un valor crítico, λ_c, el sistema bascula hacia un estado en el que resulta favorecido X_L o X_D, aunque el estado preferido resulte elegido al azar. La simetría levo-dextro se "rompe espontáneamente". El parámetro alfa (α), la diferencia entre las concentraciones de X_L y X_D, es una medida de esta asimetría. Frank E. Moss, de San Luis, y Peter V. E. McClintock, de Lancaster, efectuaron una simulación electrónica de este modelo. Encontraron (*centro*) que, al aumentar λ, la simetría se rompía y X_D se convertía en dominante, si bien la dominancia de X_L era igualmente probable. Modificaron, asimismo, la simulación para dar a X_L una pequeña ventaja sistemática, análoga a los posibles efectos de la fuerza Z (*derecha*). Cuando λ aumentaba, el sistema tomaba casi siempre la rama inferior, en la que domina X_L; la rama superior, en la que domina X_D, se convirtió en resultado improbable. Tal modelo puede explicar la dominancia en la naturaleza de los levoaminoácidos sobre los dextroaminoácidos.



7. QUIRALIDAD DE LA QUIMICA DE LA VIDA: una reliquia, quizá, de situaciones prebióticas o un artefacto de los procesos vitales. Según cierta teoría, cuando apareció la vida en la sopa primordial, la primera célula que se formó contenía sólo levoaminoácidos (*a*). Tal fenómeno, empero, hubiera sido improbable si la sopa constara de una mezcla a partes iguales de levo- y dextroenantiómeros. Otra posibilidad sería que la primera célula formada al azar contuviera un ligero exceso de levoaminoácidos (*b*) y que la selección evolutiva favoreciera la vida basada en un solo enantiómero. No han faltado quienes propusieran que la vida surgió simultáneamente en muchos puntos (*c*), basada en dextroaminoácidos en unos y en levoaminoácidos en otros; estas formas compitieron, acabando por extinguirse la vida basada en dextroaminoácidos. Una presunción alternativa, investigada por los autores, es que la ruptura espontánea de la simetría produjese una cuasi-homogeneidad quiral en cada uno de los muchos puntos donde apareció la vida (*d*). La fuerza débil, que infringe el principio de paridad, influyó en el proceso de ruptura de la simetría, favoreciendo a los levoaminoácidos.

bién, radiación electromagnética levógira (radiación polarizada, cuyo plano de polarización está girado hacia la izquierda). Vester y Ulbricht propusieron que la radiación levógira descomponía de preferencia a uno de los enantiomorfos, dejando un exceso neto de su imagen especular. Sin embargo, la asimetría que es de esperar del proceso Vester-Ulbricht resulta pequeñísima, y todavía no se ha detectado por vía experimental.

Las partículas beta pueden también descomponer directamente las moléculas quirales. Uno de los autores (Hegstrom) ha calculado que la diferencia relativa de las tasas de descomposición correspondientes a los levo- y dextroenantiómeros ronda en torno a una parte en 10^{11}. Experimentos efectuados por Arthur Rich, James C. Vanhouse y sus colaboradores de la Universidad de Michigan, han establecido que la diferencia es, en realidad, menor que una parte en 10^{9}.

Otra candidatura más es la de la propia fuerza *Z*, que puede afectar a las tasas de producción de levo- y dextroaminoácidos. Sin embargo, como se ha advertido ya, el efecto de la fuerza *Z* es tan diminuto que la diferencia esperada sería del orden de una parte en 10^{17}. Para que asimetría tan exigua produjera la dominancia observada de levoaminoácidos y dextrosacáridos, tuvo que intervenir algún mecanismo de amplificación.

Uno de los autores (Kondepudi) y George W. Nelson, que en la actualidad se encuentra en el Laboratorio Nacional de Los Alamos, han demostrado por vía teórica la existencia efectiva de tal mecanismo en sistemas químicos que no se hallan en equilibrio. Mecanismo que, en ingeniería de comunicaciones, donde se utiliza para extraer una señal de un fondo ruidoso, recibe el nombre de promediación del ruido. Imaginemos una charca de agua donde dos enantiomorfos compiten entre sí, como en el modelo de Frank. Muchas influencias aleatorias tenderán a favorecer primero la supervivencia de un enantiómero y luego la del otro. Tales fluctuaciones son mucho mayores que el efecto de la interacción fuerte; ahora bien, como son aleatorios, tienden a compensarse. Concediendo al sistema tiempo suficiente, el pequeño efecto sistemático de la fuerza débil influirá en la simetría de quiralidad, rompiéndola y empujando al sistema hacia la prevalencia de uno de los enantiómeros sobre el otro.

¿Qué condiciones se requieren para que funcione la promediación de ruido, y a qué escala temporal se desarrolla? Debería ingresar en la charca un flujo más o menos constante de los reactivos aquirales necesarios para la producción de los enantiómeros. Se trataría, en consecuencia, de un sistema abierto y alejado del equilibrio, condiciones imprescindibles para que pueda producirse la ruptura espontánea de la simetría. Los reactivos tendrían que producir enantiómeros que se replicasen y compitiesen entre sí. Y la charca tendría que ser lo suficientemente grande y agitada (una zona de unos diez kilómetros cuadrados y una profundidad de varios metros) como para eliminar, en gran medida, los efectos netos de las fluctuaciones aleatorias. De cumplirse estas condiciones, la fuerza nuclear débil, actuando durante un período de 50.000 a 100.000 años, debería poder influir decisivamente en el resultado de la ruptura de la simetría. Transcurrido ese tiempo, existe una probabilidad del 98 por ciento, cuando menos, de que casi todas las moléculas —aminoácidos, en este caso— sean levógiros (suponiendo que la fuerza débil prime a los levoenantiómeros). En un ambiente tal, podría evolucionar una vida quiralmente asimétrica, basada en levoaminoácidos.

Un proceso químico tan lento resulta difícil de observar en el laboratorio. Una elegante simulación electrónica efectuada por Frank E. Moss, de la Universidad de Missouri en San Luis, y Peter V. E. McClintock, de la Universidad de Lancaster, han confirmado la existencia del mecanismo predicho, pero todavía no se ha observado ningún mecanismo así en un sistema químico real.

¿Previo a la vida o posterior?

Hemos presentado varios modelos encaminados a mostrar cómo pudo haber surgido la asimetría quiral en las biomoléculas. La última cuestión importante es si esta asimetría surgió antes o después de la aparición de la vida original, de la "primera célula". A partir del conocimiento actual de la

estructura y función de los biopolímeros, resulta difícil comprender cómo podría funcionar una proteína, o un ácido nucleico, que estuviera compuesta, a la vez, por levo- y dextromonómeros. Los experimentos han demostrado que las ristras de aminoácidos que contienen ácidos levo y dextro no forman correctamente la configuración en hélice alfa, que es crucial para que las proteínas ejerzan función catalítica. Sin homoquiralidad (situación en la que todos los aminoácidos muestran la misma quiralidad o lateralidad), la actividad catalítica de las proteínas habría sido extremadamente baja; resulta difícil imaginar cómo podrían haber surgido, en tales condiciones, las complejas estructuras de las moléculas de la vida. Lo mismo vale para los ácidos nucleicos. Podría pensarse, pues, que la homoquiralidad de las moléculas hubo de surgir antes que la vida.

En respaldo de dicha tesis, se han propuesto diversos modelos autocatalíticos, fundados en la ruptura de la simetría, como el mecanismo Kondepudi-Nelson citado. Empero, nadie ha podido todavía señalar un conjunto particular de compuestos prebióticos que posean todas las propiedades requeridas por tales modelos. Algunos investigadores consideran que ello constituye una dificultad seria; es una de las principales razones por la que piensan que la asimetría quiral no debería haber surgido antes de la primera célula, sino después.

De acuerdo con esta concepción, la primera célula se desarrolló con carácter de acontecimiento singular y no poseía la química fuertemente quiralizada que caracteriza a la vida moderna. El "ancestro común" original de toda la vida fue accidentalmente creado con un exceso de levoaminoácidos o de dextrosacáridos, por lo que sólo incorporaba una ligera asimetría quiral. Las proteínas compuestas exclusivamente por uno de los enantiómeros son mejores catalizadores, los ácidos nucleicos compuestos por un solo enantiómero son más estables y las levoproteínas interactúan más eficientemente con los ácidos dextronucleicos. Así, pues, en un ambiente competitivo, la depuración evolutiva de las generaciones de mayor éxito produjo, de forma gradual, vida integrada totalmente por levoproteínas y ácidos nucleicos dextrógiros. Subsiste todavía el problema de imaginar un ser vivo viable —el ancestro original común— compuesto por polímeros que contuvieran números sensiblemente iguales de levo- y dextroenantiómeros. Para eludir esta dificultad, algunos estudiosos del

problema han propuesto que, por azar, la primera célula tenía ya proteínas compuestas enteramente, o casi, por levoaminoácidos. Empero, cualquier estimación razonable de la probabilidad de tal suceso da un valor nimio.

No faltan quienes hayan propuesto una tercera posibilidad, a saber, que la aparición de vida no fuera un acontecimiento singular. La ruptura de la simetría se produjo al azar en muchos lugares, sin ser influida por la fuerza débil, quiralmente asimétrica. En los lugares dominados por los dextroaminoácidos surgió "vida dextrógira"; en los lugares dominados por levoaminoácidos, "vida levógira". Ambas formas entraron en competencia, y la vida dextrógira desapareció.

Como es obvio, las preguntas clave acerca del origen de la asimetría quiral en los órganismos siguen sin respuesta, al igual que las preguntas relativas al origen de la asimetría quiral de nivel macroscópico. Aunque ahora resulta evidente que la fuerza débil, actuando en el nivel de las partículas elementales, puede ser responsable de lateralidad y asimetría izquierda-derecha en átomos y moléculas, no se sabe si estas características están expresadas en el dominio vegetal o animal. La asimetría quiral de las conchas de los caracoles, pongamos por caso, no parece tener relación alguna con la asimetría que exhiben sus ADN o sus proteínas; la descendencia de caracoles levógiros puede ser dextrógira. Las respuesta a las preguntas sobre lateralidad en caracoles, seres humanos, reyes y repollos tendrán que esperar a ulteriores revelaciones de la biología evolutiva y la biología del desarrollo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE AMBIDEXTROUS UNIVERSE: MIRROR ASYMMETRY AND TIME-REVERSED WORLDS. Segunda edición revisada y documentada. Martin Gardner. Charles Scribner's Sons, 1979.

WEAK NEUTRAL CURRENTS AND THE ORIGIN OF BIOMOLECULAR CHIRALITY. D. K. Kondepudi y G. W. Nelson en *Nature*, vol. 314, n.º 6010, págs. 438-441; 14 de abril de 1985.

PARITY VIOLATION AND THE ORIGIN OF BIOMOLECULAR CHIRALITY. Dilip Kondepudi en *Entropy, Information, and Evolution: New Perspectives on Physical and Biological Evolution*. Dirigido por Bruce H. Weber, David J. Depew y James D. Smith. The MIT Press, 1988.

MAPPING THE WEAK CHIRALITY OF ATOMS. R. A. Hegstrom, J. P. Chamberlain, K. Seto y R. G. Watson en *American Journal of Physics*, vol. 56, n.º 12, págs. 1086-1092; diciembre de 1988.

El estrés en los animales

El estudio de los papiones que viven en libertad en una reserva africana permite explicar la diferente vulnerabilidad de los seres humanos frente a las patologías relacionadas con el estrés

Robert M. Sapolsky

En 1936, Hans Selye, joven médico que empezaba su carrera investigadora en la Universidad McGill de Montreal, se encontró con un gran problema. Estuvo inyectando diariamente ratas con un extracto químico para determinar los efectos de dicha sustancia e identificó cambios apreciables en los animales: úlceras pépticas, atrofia de los tejidos del sistema inmune y crecimiento de las glándulas adrenales. Sin embargo, para su sorpresa, las ratas del grupo control, a las que había inyectado sólo una solución salina, mostraban idénticos cambios.

La mayoría de científicos hubieran arrojado la toalla ante esta paradoja. Sin embargo, Selye se fijó en lo que ambos grupos tenían en común: las inyecciones continuas. Se preguntó si el trío de cambios que había identificado era, en realidad, una respuesta fisiológica generalizada a lo desagradable per se.

Sometió a prueba la hipótesis. Descubrió los mismos tres efectos en ratas expuestas a ambientes demasiado calurosos o demasiado fríos, a toxinas patógenas y a ruidos muy intensos. Selye tomó prestado de la ingeniería un término para describir esa respuesta no específica del organismo ante una agresión. Las ratas padecían "tensiones". Así nació el campo de la fisiología del estrés.

Desde 1936, se han ido incorporando detalles importantes a la primera caracterización de la respuesta de estrés aportada por Selye. Sabemos ya que la respuesta incluye la secreción de quizá docenas de hormonas y la inhibición de otras. Asimismo, muchos estudios han demostrado que la activación crónica de la respuesta de estrés puede dañar la salud. Además, unas personas se muestran más vulnerables a las patologías relacionadas con el estrés que otras. ¿A qué obedece esa diferente susceptibilidad? ¿Débese a la mayor exposición de unas al estrés en su vida diaria o existen diferencias reales entre sus respuestas corporales al estrés?

El autor ha abordado la cuestión de una forma insólita: a través del estudio de papiones en libertad. Nuestro actual programa de investigación está proporcionando pruebas que corroboran la hipótesis según la cual las características psicológicas y sociales de las personas (por ejemplo, su comportamiento emocional, su personalidad y su posición en la sociedad) influyen de forma determinante en sus respuestas fisiológicas al estrés.

Aunque la activación crónica de la respuesta de estrés puede ser perjudicial, muy pocos individuos podrían sobrevivir largo tiempo si sus organismos fueran incapaces de emitir tal respuesta. Respuesta que le permite al organismo resistir las amenazas inmediatas contra su equilibrio homeostático o fisiológico. La respuesta se dispara ante una agresión real (factor físico de estrés), por ejemplo, el frío intenso o el ataque de un depredador, o ante la sensación de que se va a producir una agresión (factor psicológico de estrés).

A grandes rasgos, la respuesta de estrés prepara al organismo para "luchar o huir". La glucosa, fuente principal de energía del cuerpo, se pone en movimiento desde sus zonas de almacenamiento. La sangre, que transporta la glucosa y el oxígeno, se desvía de los órganos no esenciales para el ejercicio físico, tales como la piel y los intestinos, y se dirige rápidamente hacia los órganos cruciales: corazón, músculos esqueléticos y cerebro. Las modificaciones del flujo sanguíneo se consiguen mediante la constricción de determinados vasos sanguíneos, la dilatación de otros y el aumento del ritmo cardíaco. Simultáneamente, se potencian los procesos de cognición (quizá para facilitar el procesamiento de la información) y se disminuye la percepción del dolor. Las actividades fisiológicas que no comportan un beneficio inmediato se aplazan; se inhiben, por tanto, el crecimiento, la reproducción, la inflamación y la digestión, procesos todos ellos caros y optimistas.

La activación crónica de la respuesta de estrés puede perjudicar la salud por distintas vías. Con la metabolización continua de glucosa, sin respiro para almacenarla, los tejidos sanos se atrofian y fatigan. En un plazo de tiempo suficiente, los cambios cardiovasculares inducen la aparición de hipertensión, que, a su vez, puede lesionar el corazón, los vasos sanguíneos y los riñones. Más aún, cuando los procesos constructivos se postergan indefinidamente, el cuerpo lo paga: se ven afectados su crecimiento y la reparación de los tejidos, se reduce su fertilidad y, tal y como sugerían los resultados de Selye, disminuye la función inmune y aumenta la propensión a las úlceras pépticas.

Conforme se van descubriendo nuevas relaciones entre el estrés y la enfermedad, parece un milagro vivir en el mundo moderno sin sufrir alte-

ROBERT M. SAPOLSKY enseña neurobiología en la Universidad de Stanford. Es, asimismo, investigador asociado del Instituto de Investigación de Primates de los Museos Nacionales de Kenia. Se licenció por la Universidad de Harvard en 1978 y se doctoró en neuroendocrinología en 1984 por la Rockefeller. En 1987 se incorporó a la Universidad de Stanford. Cuando Sapolsky no está ocupado con su trabajo de campo, prosigue su investigación en la acción lesiva del estrés en las células cerebrales y la regulación cerebral de la liberación de las hormonas de la tensión.

raciones derivadas del estrés. Diríase, sin embargo, que la mayoría de la gente no lo acusa. La razón de ello se ha estudiado desde diferentes perspectivas. Algunos investigan directamente los efectos de la tensión en el hombre. Así, se ha descubierto que los sujetos que tienen la clásica personalidad agresiva del tipo A presentan mayor riesgo de padecer hipertensión y enfermedades cardíacas. No obstante, los fenómenos fisiológicos que relacionan la personalidad con la enfermedad, que requieren años para desarrollarse, son difíciles de determinar en los humanos; después de todo, poseen una vida emocional compleja y no pueden ser objeto de estudios de laboratorio controlados y a largo plazo.

Optando por un enfoque distinto, algunos científicos realizan sus estudios utilizando ratas de laboratorio. En los años sesenta, Jay M. Weiss, por entonces en la Universidad Rockefeller, demostró que la sensación de control o predictibilidad ejercía un poderoso influjo en la fisiología del animal. Por ejemplo, las ratas que recibían una señal de advertencia antes de ser expuestas a un shock eléctrico presentaban una respuesta de estrés menos señalada y menos patológica que las ratas que recibían la misma secuencia de choques sin previo aviso. Pero la psicología humana es, afortunadamente, más complicada que la de las ratas; por ello, la sutileza de las variables psicológicas que en estas últimas pueden estudiarse es de corto alcance.

Los primates en cautividad constituyen un buen grupo alternativo para el estudio directo de seres humanos y roedores. Ahora bien, la cautividad, provocadora de estrés en sí misma, altera la conducta del animal y afecta las medidas basales del funcionamiento fisiológico. En consecuencia, puede comprometer la generalización de cualquier resultado a las poblaciones libres.

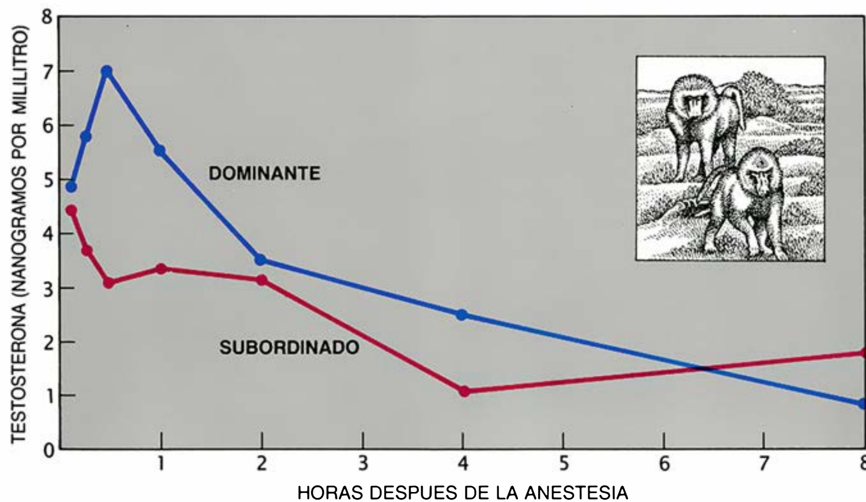
Hemos intentado soslayar algunos de los problemas asociados a la cautividad estudiando papiones de la especie *Papio anubis*, que viven en libertad en la Reserva Nacional Masai Mara de Kenia. Estos inteligentes animales constituyen un buen sustituto de los seres humanos, en parte porque sus fuentes principales de estrés, como las del hombre en la sociedad moderna, son psicológicas más que físicas. Se les proporciona alimento en abundancia; los papiones dedican sólo unas pocas horas al día para nutrirse. Hay pocos depredadores y la mortalidad infantil es baja. Con el lujo de abundancia de recursos y de tiempo libre, los animales pueden dedicarse a someterse a mutua tensión.

Estudiamos a los machos, bastante proclives a esa actividad. La violencia

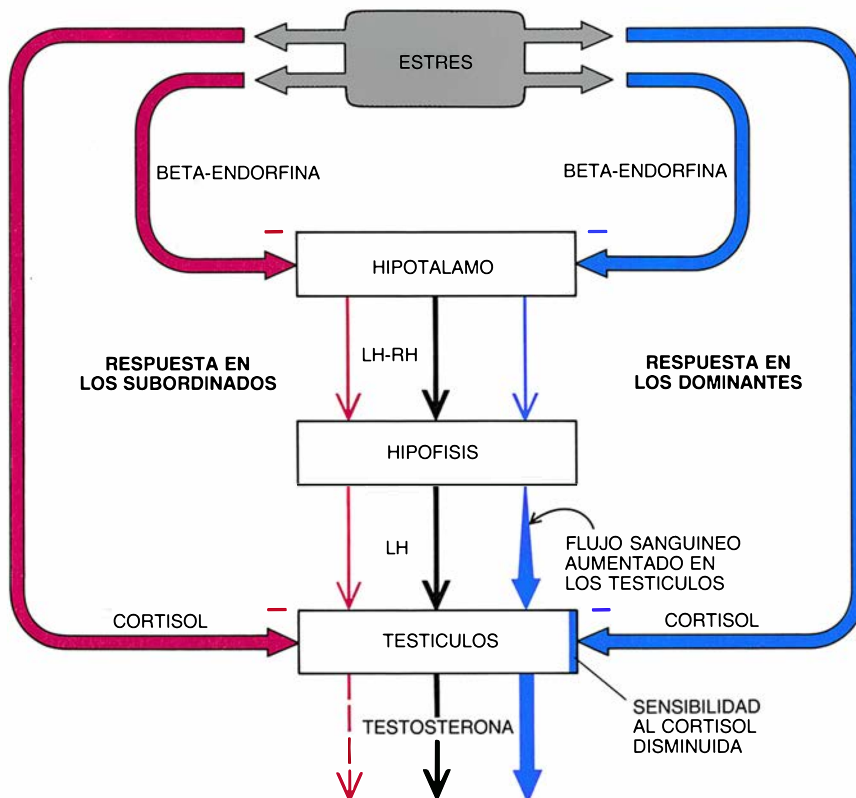




1. MACHO DE PAPION VERDOSO (*Papio anubis*) en la Reserva Nacional Masai Mara de Kenia. Acaba de cazar una gacela para alimentarse (*izquierda*). Verá terminar prematuramente su festín, ya que un macho dominante, o de rango más elevado, que viene aproximándose por atrás, expresa su interés por el botín (*derecha*). Probablemente atemorizado por el intruso, el primer papión pone pies en polvorosa. Tales escenas son frecuentes en la reserva; los papiones, al igual que los seres humanos, muestran cierta proclividad a hostigarse entre sí. El autor ha descubierto que, generalmente, el grupo de machos dominantes presenta respuestas fisiológicas al estrés diferentes de las que caracterizan a los machos subordinados.



2. NIVELES MEDIOS DE TESTOSTERONA en papiones machos dominantes y subordinados. Esencialmente iguales cuando los animales están en reposo, difieren de manera característica cuando los individuos se hallan sometidos al mismo factor de estrés; en este caso, la anestesia. Los niveles de los machos subordinados (*color rojo*) descienden enseguida, mientras que los de los machos dominantes (*color azul*) aumentan en un principio y permanecen elevados aproximadamente una hora.



3. CAUSAS de las diferencias en los niveles de testosterona en machos subordinados y dominantes durante el estrés. Cuando el animal se encuentra en reposo, la testosterona se libera como último paso de una cascada hormonal (*flechas negras*) que comienza en el hipotálamo del cerebro. El hipotálamo segrega hormona liberadora de la hormona luteinizante (LH-RH), produciendo la liberación de hormona luteinizante (LH) por parte de la hipófisis. Esta hormona estimula a los testículos, que, a su vez, liberan testosterona. El estrés dispara la liberación de beta-endorfina, una sustancia opiácea, en los machos subordinados (*flechas rojas*) y dominantes (*flechas azules*); esta sustancia inhibe (*signos negativos*) la secreción de LH-RH y, por tanto, la de LH, en ambos grupos. En los machos subordinados, los niveles de testosterona caen por la disminución de LH y por la secreción de la hormona cortisol (hidrocortisona) durante el estrés; el cortisol tiende a disminuir la respuesta de los testículos a la LH. Los niveles de testosterona en los machos dominantes aumenta porque los testículos se tornan bastante insensibles al cortisol y porque la circulación sanguínea en los testículos aumenta; durante un tiempo, este flujo mayor incrementa la cantidad de LH que llega a los testes.

propiamente dicha es, de suyo, rara, pero siempre hay conatos. Considérese qué le puede ocurrir a un pretendiente que está en compañía de una hembra en celo y debe permanecer atento durante el período de cortejo para evitar que otros machos ocupen su plaza. Con frecuencia, un macho rival seguirá de cerca a la pareja durante días, saboteando los intentos de apareamiento del pretendiente inicial. Puede que el intruso nunca provoque formalmente una pelea, pero mantiene una presión inexorable sobre el macho pretendiente. No es raro que estas partidas de ajedrez acaben con la rendición del exhausto primer galante.

En otras situaciones competitivas, un macho se alía con un segundo macho en contra de un tercero. Si estas alianzas son estables, resultan muy ventajosas. Sin embargo, la estabilidad a largo plazo es poco frecuente. Tras pasar horas preparando la coalición, un papión puede verse abandonado en medio de una pelea o, lo que es peor, sentirse doblemente engañado al ver cómo su antiguo y oportunista colega cambia de bando.

Algunos individuos sufren más castigo que otros. Los machos forman jerarquías dominantes y los animales que ocupan las posiciones subordinadas viven bajo la tensión de una carencia de control y de predictibilidad. Los machos dominantes tienen un acceso más fácil a la comida, a los lugares de descanso seguros y a los rincones de sombra durante el mediodía. A menudo, les resulta más fácil también el acceso a una compañera sexual, amén de acompañarse mejor en su acicalamiento por otros. Los machos subordinados se ven obligados, por contra, a excavar y a extraer laboriosamente raíces para conseguir la parte de comida que los machos dominantes han despreciado. Los dominantes que pierden una batalla buscan frecuentemente un subordinado para desahogar su frustración y es probable que agredan al inocente espectador sin previo aviso.

Viven en una estructura social de dimensiones maquiavélicas: desde cambios de alianzas impredecibles, hasta situaciones amenazantes que van desde días de hostigamiento a estallidos súbitos de violencia. Además, un papión decidido a evitar los tumultos puede, pese a todo, caer víctima de los problemas de otro.

Cuando empecé a estudiar los papiones oliváceos en 1978, una de mis primeras tareas fue la de determinar si dos sujetos expuestos a idén-

tico factor de estrés desencadenaban respuestas fisiológicas distintas. Al observar que el rango de un macho influía determinantemente en su comportamiento diario y en el trato que recibía de los demás, me planteé si ese rango condicionaba la respuesta de los machos al estrés. Dicho de otra manera: ¿diferiría la respuesta fisiológica de los machos dominantes y subordinados?

Difería. Me apresté, pues, a estudiar la naturaleza de esa diferencia en detalle, así como sus posibles causas.

Cada año paso tres meses en Kenia, donde estudio a los papiones oliváceos siguiendo una rutina establecida. Suelo contar con la ayuda de un asistente keniata, Richard Kones. Empezamos por determinar el rango social de los machos durante esa estación, lo que esencialmente consiste en evaluar con qué frecuencia los animales consiguen lo que quieren. Con ese propósito, clasificamos los animales según su capacidad de ganar la mayoría de sus peleas, de ser los hostigadores con más frecuencia que los hostigados y de suplantar a otro macho (que está, por ejemplo, descansando en una sombra apetecible, comiendo o siendo acicalado por otros). Considero que los machos que se encuentran en la mitad superior de la jerarquía son dominantes y, subordinados, los que caen en la mitad inferior.

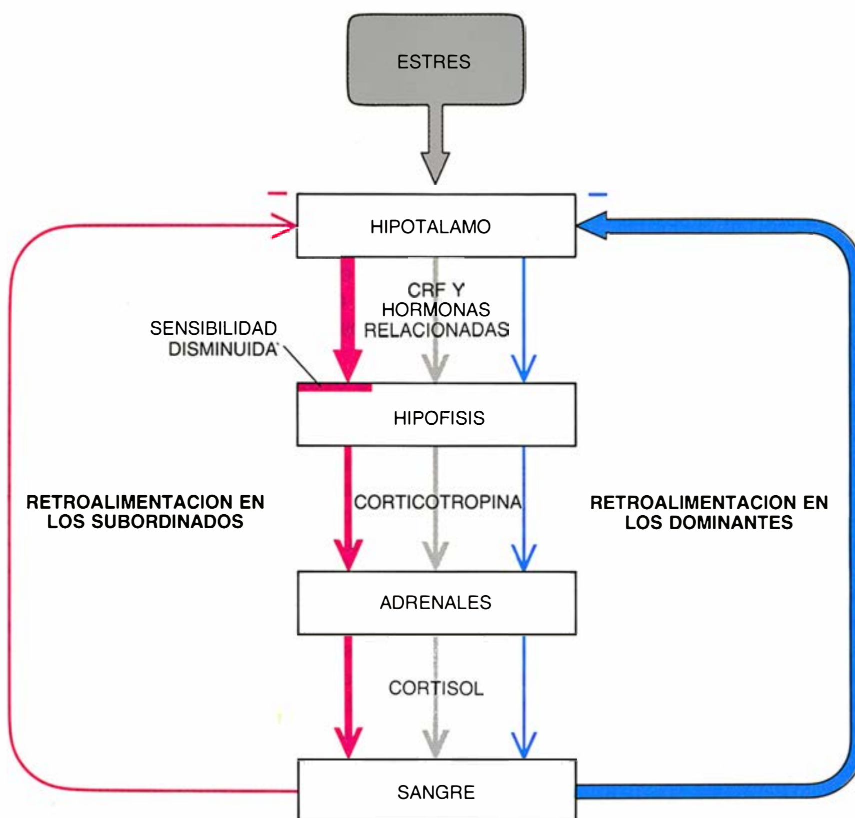
Una vez definidas las posiciones sociales de los machos, determino sus niveles hormonales basales y mido sus respuestas metabólicas ante un factor de estrés físico: la anestesia, que provoco disparándoles una aguja con una pistola de aire. Antes de perder el conocimiento, los animales se sienten momentáneamente desorientados, lo que parece desencadenar la respuesta de estrés. La inyección de anestesia, amén de ponerlos en tensión, nos permite obtener repetidas muestras de sangre durante el día y, por tanto, rastrear los cambios en los niveles hormonales del animal.

Al disparar he de tener en cuenta varios requisitos. Se debe inyectar a todos los papiones en el mismo momento del día, para controlar las fluctuaciones rítmicas de los niveles hormonales. No se debe disparar contra ningún animal que haya sido herido, haya estado enfermo recientemente, se haya apareado o participado en una pelea importante; tales experiencias alterarían los niveles hormonales de reposo o basales. Por la misma razón, he de asegurarme de que los animales no han comido antes de anestesiarlos. Los animales no deben sentirse acechados; de lo contrario, los datos podrían distorsionarse por culpa de una tensión anticipada. Finalmente, debe extraerse una muestra de sangre inicial (mediante la cual se establecen los niveles basales de las hormonas que se van a estudiar), minutos después de que se inyecte la anestesia; si transcurre demasiado tiempo, los niveles de las hormonas de interés habrán variado.

Con esta estrategia, he descubierto que, cuando la jerarquía de dominación es estable (como acostumbra serlo), el funcionamiento de casi todos los sistemas fisiológicos que he examinado difiere en los machos dominantes del registrado en los subordinados. También se observa que el perfil fisiológico de los animales subordinados es similar al tipo que, según se piensa, predispone a los humanos a padecer las enfermedades relacionadas con el estrés.

El sistema hormonal que controla la secreción de la testosterona (la principal hormona de la reproducción en los machos) constituye un buen ejemplo de cómo la respuesta de estrés de los papiones dominantes diverge de la presentada por los subordinados. Aunque los niveles medios de reposo de la testosterona sean esencialmente los mismos en ambos grupos, dichos niveles difieren por completo cuando el animal está bajo tensión.

Normalmente, la testosterona se libera como punto final de una cascada de secreciones hormonales que comienza en el cerebro. Allí, el hipotálamo suelta la hormona liberadora de la hormona luteinizante, que



4. MECANISMO que regula la liberación del cortisol, alterado en los machos subordinados. Nos ayuda a entender por qué, bajo circunstancias normales, los niveles basales medios de los machos subordinados son superiores a los de los machos dominantes. En ambos grupos de animales la liberación de cortisol aumenta en respuesta al estrés (*flechas grises*): el hipotálamo segrega factor liberador de la corticotropina (CRF) y hormonas relacionadas que estimulan la hipófisis para que libere corticotropina, que produce, a su vez, la liberación de cortisol en sangre por parte de las glándulas adrenales. En los machos dominantes (*flechas azules*), el hipotálamo recibe información correcta desde la sangre, de manera que el cerebro se entera enseguida cuándo se alcanza determinado nivel de cortisol; en ese momento, el cerebro inhibe la secreción de CRF y sustancias afines, produciéndose una disminución en la liberación de cortisol. En los papiones subordinados (*flechas rojas*) la señal de retroalimentación es débil y, por tanto, el cerebro cree que los niveles de cortisol son bajos, aunque se encuentren, en realidad, elevados. En consecuencia, el hipotálamo aumenta notablemente su secreción de CRF y hormonas relacionadas. La hipófisis de los subordinados es algo insensible a tales sustancias; de todas maneras, las grandes cantidades que llegan a esta glándula aumenta la secreción de corticotropina, que conduce, a su vez, a la hipersecreción crónica de cortisol.

estimula la hipófisis para liberar la hormona luteinizante. Esta hormona, a su vez, desencadena la liberación testicular de testosterona.

En los papiones dominantes y subordinados, lo mismo que en los humanos y en las ratas, los niveles de testosterona descienden drásticamente en respuesta al estrés. Sin embargo, el parecido entre los machos dominantes y los subordinados termina aquí. Después de la inyección, los niveles de testosterona de los subordinados bajan rápidamente, mientras que los de los machos dominantes aumentan y permanecen elevados durante aproximadamente una hora, antes de disminuir.

En teoría, el aumento de testosterona podría proporcionar a los machos dominantes una ventaja social y mayor supervivencia, ya que la hormona aumenta la velocidad con que la glucosa alcanza los músculos. Cabría esperar que tales cambios ayudaran a los dominantes a afrontar una amenaza física. (La testosterona regula también la conducta sexual y la agresividad, pero la magnitud y la duración del aumento de testosterona observado en los dominantes sometidos a tensión no bastaría para mejorar la actividad sexual o para aumentar la agresividad de estos animales en comparación con otros.)



5. TRAICION DE UN COMPANERO durante una pelea, un factor de estrés típico entre los papiones. Con frecuencia, los machos forman coaliciones para las batallas, pero nunca saben si el

¿Cuál es la causa del descenso de los niveles de testosterona durante el estrés y mediante qué mecanismo se elevan dichos niveles en los machos dominantes durante algún tiempo? He descubierto que la secreción, inducida por el estrés, de una sustancia opiácea, la beta-endorfina, un supresor del dolor conocido principalmente por causar la llamada "resistencia de los corredores", dirige en parte el descenso de los niveles de testosterona. La beta-endorfina, que se segrega en varios órganos, suprime la secreción hipotalámica de la hormona liberadora de la hormona luteinizante, lo que suprime, a su vez, la secreción hipofisaria de la hormona luteinizante, determinando un descenso en la cantidad de hormona luteinizante que llega a los testículos. Descubrí que la beta-endorfina intervenía en el descenso de la hormona luteinizante administrando a los papiones una droga que bloqueaba el acceso del opioide a sus receptores hipotalámicos. Cuando se bloqueaba así la actividad de la beta-endorfina, no se producía el correspondiente descenso de los niveles de hormona luteinizante inducido por la tensión.

Otra causa de la caída de los niveles de testosterona es una disminución de la sensibilidad de los testículos a la hormona luteinizante. La hormona cortisol, o hidrocortisona, que se libera desde las glándulas adrenales en cantidades importantes durante el estrés, induce ese cambio.

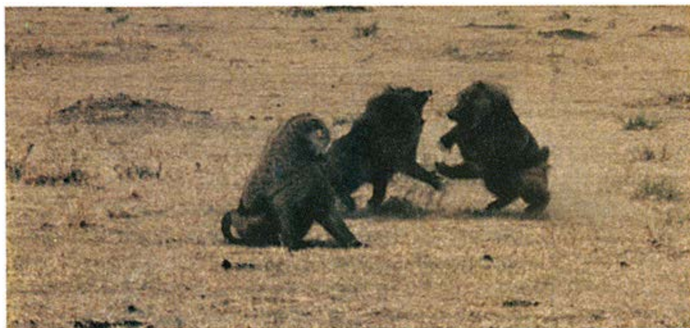
El aumento inicial en los niveles de testosterona después de inyectar a los machos dominantes no se puede explicar por los cambios en la actividad del cerebro ni de la hipófisis, ya que los niveles de hormona luteinizante liberada por esta glándula disminuyen por igual en dominantes y subordinados. Tampoco están implicados los niveles de cortisol; son idénticos durante el estrés en ambos grupos. Por tanto, debe buscarse la explicación en otra parte.

He observado un mecanismo bifásico que podría ser el determinante. Por una parte, los testículos de los machos dominantes pierden sensibilidad ante los efectos inhibidores del cortisol sobre la testosterona. Ahora bien, si el mecanismo responsable fuera exclusivamente la disminución de la sensibilidad al cortisol, se enlentecería la disminución de los niveles de testosterona pero no se produciría el aumento inicial.

Probablemente, dicho aumento obedece a la liberación inducida por el estrés por parte del sistema nervioso simpático de catecolaminas, tales como adrenalina y noradrenalina, que influyen en la circulación de la sangre. Por razones que desconocemos, el sistema vascular de los testículos de los machos dominantes se muestra particularmente sensible a los efectos dilatadores de las catecolaminas; de ese modo, los testículos de los machos dominantes podrían recibir una mayor irrigación sanguínea durante el estrés que los de los subordinados. En consecuencia, aunque la liberación de hormona luteinizante desde la hipófisis disminuya en ambos grupos, probablemente la hormona luteinizante en la sangre, si bien escasa, alcanza antes los testículos de los machos dominantes. Este proceso produciría un aumento temporal en la cantidad de hormona luteinizante que llega a los testículos y, en consecuencia, un aumento en la producción testicular de testosterona.

Mi trabajo me ha permitido descubrir diferencias asociadas a la posición social en los sistemas responsables del aumento de cortisol en sangre durante el estrés. La secreción de cortisol, al igual que la de testosterona, constituye el paso final de una cascada de secreción hormonal que comienza en el cerebro. En este caso, cuando el animal está sometido a tensión, el hipotálamo aumenta su producción de factor liberador de la corticotropina y de hormonas relacionadas. Estas hormonas activan la liberación, desde la hipófisis, de la hormona adrenocorticotrópica, también llamada corticotropina. La corticotropina estimula, a su vez, las glándulas adrenales para que liberen cortisol.

El cortisol es responsable de gran parte del comportamiento de doble filo de la respuesta de estrés. A corto plazo moviliza energía, pero su producción mantenida crónicamente contribuye al agotamiento de los músculos, hipertensión y alteración en el sistema inmune y en la fertilidad. Por tanto, es evidente que deberá secretarse cortisol en gran cantidad en respuesta a una situación amenazante; hormona que deberá mantenerse a raya en otros casos. Esto es precisamente lo que ocurre en los machos dominantes. Sus niveles de cortisol, en situación de reposo, son menores que los de los machos subordinados, pero aumentarán más deprisa si aparece un factor de estrés. Se desconocen los mecanismos exactos por los que se consigue este aumento más rápido.




compañero es de fiar. En una escena común, dos parejas de animales se enfrentan (*izquierda*). Cuando empieza la pelea, un animal abandona a su compañero, que debe arreglárselas solo (*centro*). Uno de los miembros de la pareja opuesta también claudica; sólo quedan dos (*derecha*).

Determinamos la causa de que los machos subordinados presenten niveles basales de cortisol más elevados mediante el estudio diferencial de los distintos tramos de la cascada que conduce a la liberación de la hormona y a su eliminación de la circulación sanguínea. Observando la sucesión de fenómenos en sentido contrario, desde la sangre hasta el cerebro, el autor descubrió que el cortisol se eliminaba de la sangre a la misma velocidad en machos dominantes y subordinados. Por tanto, los niveles superiores de cortisol en los subordinados proceden de un exceso de secreción de cortisol por parte de las glándulas adrenales.

Este exceso de secreción de cortisol podría deberse a una mayor sensibilidad de las glándulas adrenales ante la corticotropina, a una secreción adicional de corticotropina por parte de la hipófisis o a ambos procesos. Observé que las glándulas adrenales de los machos subordinados no eran más sensibles; por tanto, tenían que hallarse expuestas a una cantidad mayor de corticotropina.

De forma similar, la hiperproducción de corticotropina podría resultar de un aumento de la sensibilidad de la hipófisis al factor liberador de corticotropina y sustancias relacionadas, de un exceso de la producción de estas sustancias en el cerebro o de ambas cosas. Descubrí que la sensibilidad de la hipófisis estaba disminuida en los animales subordinados. Era, pues, probable que el cerebro produjera factor liberador de corticotropina y sustancias asociadas en exceso, dando origen, en última instancia, a niveles sanguíneos de cortisol elevados. No se puede medir la liberación de hormonas en el hipotálamo sin dañarlo, pero mi conclusión se ve apoyada por Philip W. Gold y sus colaboradores, del Intituto Nacional de Salud Mental, quienes llegaron a una conclusión esencialmente igual cuando investigaron las causas de los elevados niveles basales de cortisol en seres humanos que se hallaban deprimidos.

¿Por qué los cerebros de los papiones subordinados estimulaban una producción excesiva de cortisol cuando se encontraban en reposo? Parte de la respuesta yace, sin duda, en la propia vida en tensión que llevan los animales; traería consigo estimulaciones frecuentes de la secreción de cortisol. Los animales hallan, además, cierta dificultad para regular el sistema responsable de la secreción de cortisol.

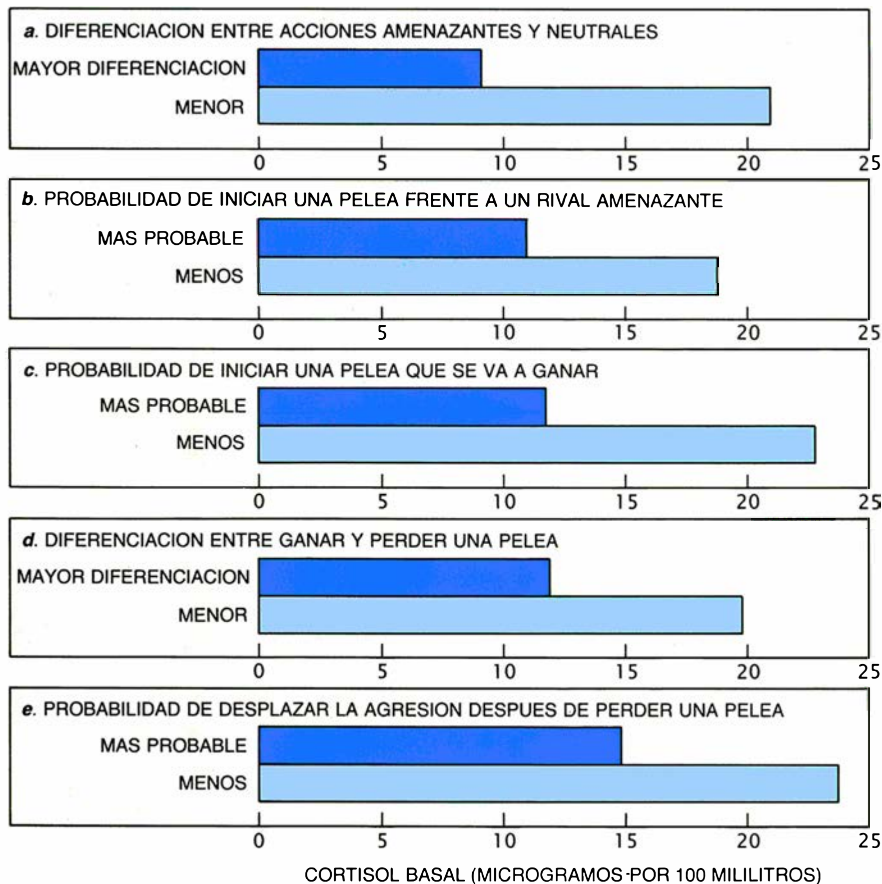
En cualquier cadena de mando el jefe necesita retroalimentación, alguna señal de que se están obedeciendo las órdenes. En este sistema, el cerebro debe percibir los niveles de cortisol, la hormona final segregada en la cascada de respuesta al estrés. El cerebro seguirá estimulando la secreción de cortisol hasta que se alcance cierto nivel umbral de la hormona, en cuyo momento debe inhibir dicha secreción. Nos cuestionamos si los sensores cerebrales de los niveles de cortisol sanguíneos de los subordinados funcionarían correctamente. Comprobé que no era así.

Para verificar el funcionamiento de dichos sensores, administré dexametasona, cortisol sintético, a varios papiones. En los machos dominantes, lo mismo que en la mayoría de la gente, el cerebro detecta la presencia de dexametasona y responde restringiendo, primero, la secreción del factor liberador de corticotropina, a continuación la de la corticotropina y, por último, la de cortisol. En cambio, los subordinados (y las personas depresivas) son resistentes a la dexametasona, es decir, sus cerebros se manifiestan insensibles ante la señal de restricción. En virtud de ello, la producción de cortisol continúa sin control alguno.

Seguimos ignorando si los machos subordinados se ven afectados por sus niveles basales de cortisol elevados, aunque se han detectado ciertas señales de peligro. En este sentido, Glen E. Mott, de la Universidad de Texas en San Antonio, y el autor hallaron pruebas que sugerían que los machos subordinados podrían correr un mayor riesgo de aterosclerosis y, por tanto, de enfermedades cardíacas. En comparación con los machos dominantes, los subordinados presentan menos colesterol HDL circulante, que es el tipo "bueno" que ayuda a prevenir la aterosclerosis. Esta diferencia no cabía atribuirla a la dieta, al grado de actividad física, al peso corporal, factores genéticos ni a los niveles de testosterona; sí guardaba relación con el cortisol. Descubrimos que, cuanto más elevados eran los niveles basales de cortisol de un papión verdoso u oliváceo, tanto menores eran los niveles de colesterol HDL. Por otro lado, en estudios de laboratorio se ha demostrado que el cortisol puede suprimir la producción de colesterol HDL.

Sabido es que el cortisol suprime la función inmune durante el estrés. Comparé, por ende, una medida de dicha función en los dos grupos de papiones. De hecho, los machos subordinados tienen menos linfocitos en circulación (glóbulos blancos) que los machos dominantes. Aunque estos signos relativos al colesterol HDL y a los linfocitos son de mal pronóstico, la determinación de si los subordinados corren mayor riesgo de infartos cardíacos y de infecciones sólo puede hacerse estudiando estos animales a lo largo de toda su vida. Un factor que dificulta tal análisis estriba en el rango social, que puede variar con el tiempo: los machos dominantes que hacen estragos hoy podían haber sido serviles subordinados cuando los observé por primera vez en 1978.

Aun considerando esta limitación, interpreté inicialmente mis datos



6. PAPIONES VERDOSOS DOMINANTES con ciertos rasgos de personalidad (*azul oscuro*) presentan niveles basales de cortisol inferiores que otros machos dominantes (*azul claro*), lo que sugiere que la actitud constituye un mediador fisiológico más importante que el propio rango. Los machos dominantes que pueden distinguir entre las acciones amenazadoras y neutrales de un rival presentan niveles de cortisol casi un 50 por ciento inferiores a los de otros machos dominantes (*a*). Asimismo, se encuentran niveles de cortisol inferiores en los machos que empiezan una pelea amenazando a un rival en vez de esperar a ser atacados (*b*), los que saben en qué peleas enfrascarse, y, por tanto, cuándo es probable que ganen las que empiezan (*c*), los machos que saben si han ganado o perdido una lid (*d*) o los que, cuando pierden, descargan su frustración en otros papiones subordinados (*e*).

como indicadores de que la fisiología de los machos subordinados constituía un factor que predisponía a las enfermedades relacionadas con la tensión. La información recogida sugería que el rango era el destino fisiológico, y los otros sistemas fisiológicos que había estudiado en estos animales daban esta misma impresión.

¿Qué característica del rango influye principalmente sobre la fisiología? Mis propias observaciones y otros estudios con animales en cautividad me indujeron a la sospecha de que los beneficios psicológicos resultantes de un rango elevado podrían revestir especial interés. Tuve el primer indicio de la importancia decisiva de dichos factores psicológicos en 1981, cuando la estabilidad de la jerarquía de dominación de los papiones se tambaleó. Los machos de más alto rango, o machos alfa, de mi grupo de estudio estaban en decadencia y no tenían herederos; existe, por lo común, algún individuo de segundo rango que está presionando sobre el macho alfa para que deje su lugar. Ese año, por contra, había media docena de jóvenes que habían formado una coalición para expulsar al macho alfa. Sin embargo, una vez terminada con éxito la maniobra, se desintegró la coalición rápidamente. Cada uno dominaba, por separado, al resto de machos del grupo, pero entre ellos no se establecía ninguna jerarquía clara. Siguieron meses de inestabilidad: se formaban coaliciones entre subgrupos de machos dominantes, que se deshacían enseguida. Aumentó la agresividad y las interacciones entre machos por conseguir una posición de dominio y los rangos variaban continuamente.

Durante el conflicto, las correlaciones ventajosas fisiológicas del rango dominante observadas otros años desaparecieron. A diferencia de los machos dominantes en otras estaciones de estudio, los que dominaban en 1981 eran, en su fisiología, similares a los subordinados: presentaban niveles basales de cortisol elevados y menor secreción de esta misma hormona en respuesta a la tensión. Tampoco mostraban un aumento transitorio de testosterona durante el estrés. Estos hallazgos me movieron a pensar que los perfiles "mejores", observados en los machos dominantes de años anteriores, derivaban en parte del sentimiento de control y predictibilidad que se adquiere al encontrarse en la cúspide de una jerarquía estable. Aunque los machos dominantes en 1981 tenían el mismo rango elevado y poder advertido en los dominantes de otros años, no poseían el mismo sentimiento de seguridad.

Muchos investigadores han encontrado resultados similares en sus trabajos con primates en cautividad, tales como los monos rhesus y otros del género *Saimir*. Cuando se forman nuevos grupos sociales, los machos dominantes presentan niveles basales más elevados de cortisol y de testosterona y manifiestan mayor agresividad. Una vez se estabiliza una jerarquía de dominio, aparece un cuadro que recuerda al que he observado en los papiones durante épocas de estabilidad.

La investigación con animales cautivos indica también que el perfil hormonal óptimo observado en machos dominantes durante los períodos estables constituye un efecto y no una causa del elevado rango del animal. Si las peculiaridades hormonales influyeran sobre el rango, los animales cautivos mostrarían diferentes perfiles, antes incluso de que se establecieran nuevos grupos sociales. No es así. Por tanto, los beneficios fisiológicos observados en los machos dominantes parecen proceder de la dominación, y no dar origen a ella; amén de aparecer sólo cuando esa dominación trae consigo ciertas ventajas psicológicas.

Mis estudios más recientes han modificado mis ideas acerca de la influencia del rango sobre la fisiología. A tenor de los mismos, la fisiología ventajosa de que disfrutan los machos dominantes en una jerarquía estable no es resultado real de la dominación. Más bien al contrario, la fisiología "mejor", observada en los machos dominantes como grupo, corresponde a un subgrupo de individuos que presentan rasgos de personalidad peculiares. Al parecer, tales

rasgos les permiten a los animales obtener todas las ventajas psicológicas de su elevada posición y pueden, de hecho, facilitar en un principio la llegada de esos animales al escalafón de los dominantes.

Con mi alumna Justina C. Ray, descubrí la importancia de la personalidad mientras analizábamos el comportamiento de machos dominantes, formalizando cuantos elementos diferentes de "estilo" podíamos imaginar. (Estamos ahora estudiando esos mismos parámetros en los subordinados.) Encontramos niveles basales de cortisol bajos —nuestro indicador de una fisiología óptima— sólo en los machos que presentaban una, al menos, de las siguientes características: distinguir bien entre las acciones amenazantes y neutrales de un rival (evidenciado por el diferente comportamiento posterior a dichas acciones), controlar la situación iniciando la pelea, si el rival supone, de hecho, una amenaza, comportarse de manera distinta después de ganar o de perder una pelea y desplazar la agresividad hacia un tercer individuo cuando se perdía la lid. Los machos dominantes que no presentan tales habilidades tienen niveles basales de cortisol similares a los de los machos subordinados.

Las implicaciones generales de estos hallazgos guardan coherencia con los consejos que se administran en general en las sesiones para controlar el estrés, en las que se advierte que la capacidad para predecir y controlar las consecuencias de las interacciones sociales y para encontrar vías de salida a las tensiones ayudan a evitar los efectos a largo plazo del estrés. El acierto de estas recomendaciones viene reforzado por las importantes diferencias en los niveles basales de cortisol entre los machos dominantes que presentan tales características y los que no; las divergencias entre ambos grupos son mayores que las diferencias de niveles de cortisol entre los machos como grupo dominante y los subordinados. Este hallazgo indica que el número de factores de estrés sociales a los cuales está sometido un individuo importa menos, desde el punto de vista fisiológico, que el estilo emocional con el que se perciben y se afrontan dichos factores provocadores de tensión.

Los estudios con seres humanos han demostrado también que un sentimiento de control sobre los conflictos y la capacidad de desahogarse son beneficiosos para la fisiología. Así, en un estudio clásico se observó que los padres cuyos hijos padecían cáncer presentaban niveles de cortisol elevados. Sin embargo, la cuantía de dicho aumento variaba con el modo en que cada progenitor abordaba el problema. Se encontraron niveles de cortisol mucho más bajos en los padres que tenían defensas psicológicas contra la ansiedad; por ejemplo: fe religiosa, capacidad para negar la gravedad de la enfermedad del hijo o tendencia a desplazar la ansiedad dedicándose por completo al cuidado del paciente.

Quizá resulte demasiado trivial concluir que lo importante es la actitud, que se debe diferenciar entre lo que se puede y no se puede cambiar (y aceptar, en su caso, lo último) y que hay que buscar asideros de control y de predictibilidad en circunstancias difíciles. Pero mis estudios, al igual que muchos otros, han demostrado que la fisiología asociada al estrés es notablemente sensible a esas actitudes y que los filtros psicológicos a través de los cuales se perciben los fenómenos externos pueden afectar a la fisiología, al menos tan intensamente como lo hacen los propios fenómenos.

Para los humanos y los animales de inteligencia pareja, los factores de tensión de la vida son principalmente sociales y, por tanto, sutiles y ambiguos. En la medida en la que los nuestros sean invenciones de la mente, dispondremos también de los medios para afrontarlos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PSYCHOENDOCRINOLOGY. Robert M. Rose en *Williams Textbook of Endocrinology*. Séptima edición. Dirigido por Jean D. Wilson y Daniel W. Foster. W. B. Saunders, 1985.

SEX & FRIENDSHIP IN BABOONS. Barbara Boardman Smuts. Aldine Publishing Co., 1985.

STRESS, SOCIAL STATUS, AND REPRODUCTIVE PHYSIOLOGY IN FREE-LIVING BABOONS. Robert M. Sapolsky en *Psychobiology of Reproductive Behavior: An Evolutionary Perspective*. Dirigido por David Crews. Prentice Hall, 1987.

THE PSYCHONEUROENDOCRINOLOGY OF STRESS—A PSYCHOBIOLOGICAL PERSPECTIVE. Seymour Levine, Sandra G. Wiener y Christopher Coe en *Psychoendocrinology*. Dirigido por Seymour Levine y F. Robert Brush. Academic Press, 1989.

STYLES OF DOMINANCE AND THEIR ENDOCRINE CORRELATES AMONG WILD OLIVE BABOONS (*PAPIO ANUBIS*). R. Sapolsky y Justina C. Ray en *American Journal of Primatology*, vol. 18, n.° 1, págs. 1-13; 1989.

Microplasmas

Dos o más átomos —desprovistos de sus electrones más externos, atrapados por campos electromagnéticos y enfriados a temperaturas cercanas al cero absoluto— se comportan como líquidos y sólidos

John J. Bollinger y David J. Wineland

En 1973, un recipiente cuyas "paredes" estaban formadas por campos eléctricos y magnéticos atrapó un solo electrón. Siete años después, un dispositivo similar confinó un átomo. La tecnología permitió a los físicos medir las propiedades de los electrones y los átomos con un detalle sin precedentes. Los investigadores que iniciaron estos experimentos, Hans G. Dehmelt, de la Universidad de Washington, y Wolfgang Paul, de la de Bonn, compartieron el premio Nobel de física en 1989. Empleando el mismo control sobre la temperatura y posición de los átomos, estamos investigando, junto con nuestros colaboradores, las teorías fundamentales de la estructura atómica atrapando hasta 15.000 iones (átomos privados de uno o varios electrones). Lo que se obtiene se denomina microplasma, por extensión de los grandes grupos de iones y electrones que constituyen los plasmas.

Un microplasma se forma aplicando primero campos electromagnéticos que confinen los iones en una región determinada del espacio. La técnica de enfriamiento láser puede, entonces, enfriar los iones atrapados hasta temperaturas por debajo de la centésima de grado kelvin. Los microplasmas pueden formarse prácticamente con los iones uno a uno; gracias a lo cual, ofrecen una oportunidad excelente para explorar los sistemas mesoscópicos, es decir, grupos de iones cuyo exiguo número les impide comportarse como un sistema macroscópico corriente, y cuya complejidad no les permite identificarse con el comportamiento de un solo ion. Además, los microplasmas sirven de modelos de los plasmas densos de los objetos estelares.

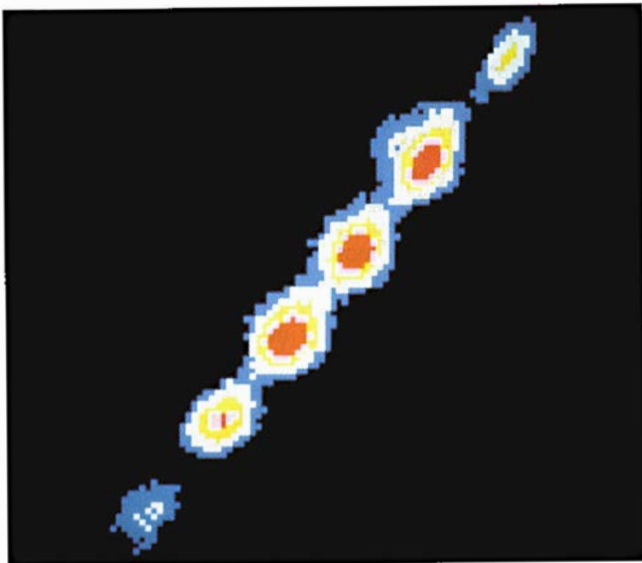
Igual que los átomos de los líquidos, los iones de algunos microplasmas fríos se difunden a través de un estado parcialmente ordenado. Otras veces, los iones se parecen a los átomos de los sólidos y se difunden muy lentamente a través de la red cristalina. Sin embargo, la naturaleza de los microplasmas difiere mucho de la que caracteriza a los líquidos y sólidos convencionales. Los líquidos y sólidos comunes tienen densidades de unos 10^{23} átomos por centímetro cúbico; los microplasmas poseen, por contra, concentraciones de unos 10^8 iones por centímetro cúbico. En consecuencia, la distancia media que separa los iones de un microplasma es unas 100.000 veces mayor que la distancia entre átomos de los líquidos o sólidos corrientes. Además, mientras que las fuerzas atractivas internas entre los átomos mantienen unido un líquido o sólido convencional, los campos eléctrico y magnético externos mantienen unidos los microplasmas de iones atrapados. En verdad, los iones, todos con la misma carga, se repelen entre sí y tienden a dispersar el microplasma.

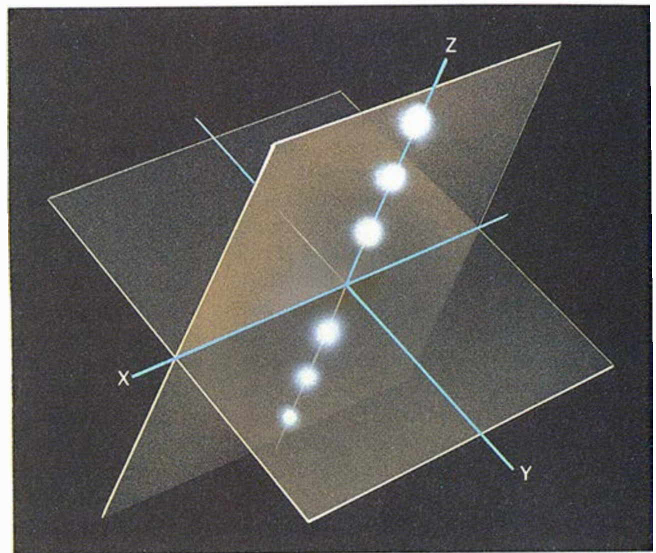
Las primeras investigaciones acerca de estos pequeños plasmas fríos empezaron hace más de un decenio. En 1977, John H. Malmberg y Thomas M. O'Neil, de la Universidad de California en San Diego, sugirieron que un conjunto de electrones o iones en una trampa electromagnética se parecerían a un tipo de materia conocido por plasma de un componente. En tal plasma, un fondo de carga uniforme y rígido confina las partículas idénticas móviles de carga opuesta. El calor específico, el punto de fusión y otras propiedades termodinámicas de un plasma de un componente dependen, sobre todo, de la densidad y la temperatura de las partículas móviles.

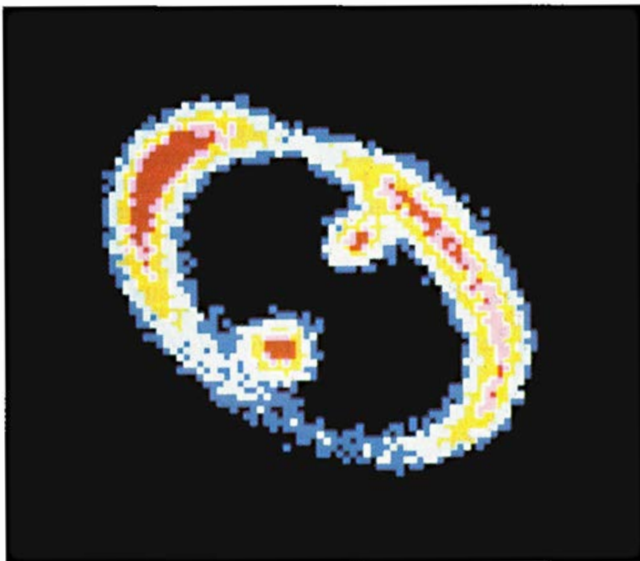
Un único parámetro adimensional, conocido por acoplamiento, que puede deducirse de la densidad de partículas y de la temperatura, describe las propiedades termodinámicas de un plasma de un componente, y ofrece una medida de cuán fuertemente interaccionan los iones vecinos. El acoplamiento se define como la energía potencial de Coulomb entre iones vecinos inmediatos dividida por la energía cinética de los iones. La energía potencial de Coulomb depende, a la vez, de la distancia media entre los iones (una función de la densidad) y de la carga de los iones. La energía cinética es la temperatura multiplicada por la constante de Boltzmann, una constante física.

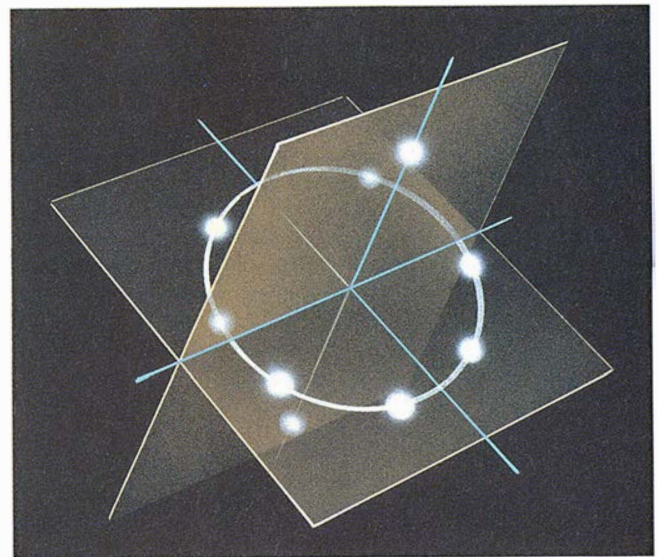
Cuando la energía potencial de Coulomb es menor que la energía cinética —es decir, cuando el acoplamiento es menor que la unidad—, el plasma de un componente no debería tener una estructura obvia y habría de comportarse como un gas. Pero un plasma de un componente cuyo acoplamiento es mayor que uno debería mostrar algún ordenamiento espacial. En tales plasmas de un componente fuertemente acoplados, los iones tendrían que permanecer alejados entre sí porque las fuerzas de Coulomb repulsivas son mayores que las fuerzas térmicas. Para valores del acoplamiento de dos o más, un plasma debería mostrar el comportamiento de un líquido. Para acoplamientos cercanos a 180, un plasma de un com-

JOHN J. BOLLINGER y DAVID J. WINELAND son físicos del Instituto Nacional de Normalización y Tecnología en Boulder, Colorado. Su trabajo acerca de los microplasmas surgió de los esfuerzos empeñados en el desarrollo de técnicas de espectroscopía de alta resolución de iones almacenados. Bollinger inició su formación en la Universidad de Cornell y se doctoró, en 1981, por la de Harvard. Wineland comenzó la carrera de física en la Universidad de California en Berkeley y la culminó con el doctorado en Harvard, en 1970. Procedente de la Universidad de Washington, entró en el Instituto en 1975.

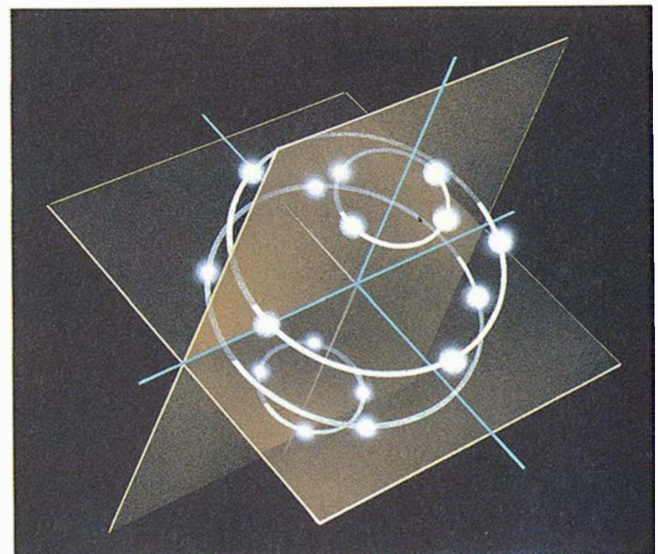












1. MICROPLASMAS formados por seis, nueve y 16 iones de mercurio (*arriba, centro y abajo, respectivamente*) mantenidos en una trampa de Paul. El diagrama estructural adjunto a cada fotografía muestra la estructura predicha para cada microplasma por Wayne Itano, del Instituto Nacional de Normalización y Tecnología de los EE.UU. Aunque los iones mantienen las mismas posiciones relativas, orbitan en torno al eje *z*.

ponente cambiará de fase líquida a sólida, en la que los iones se disponen según un cristal cúbico centrado.

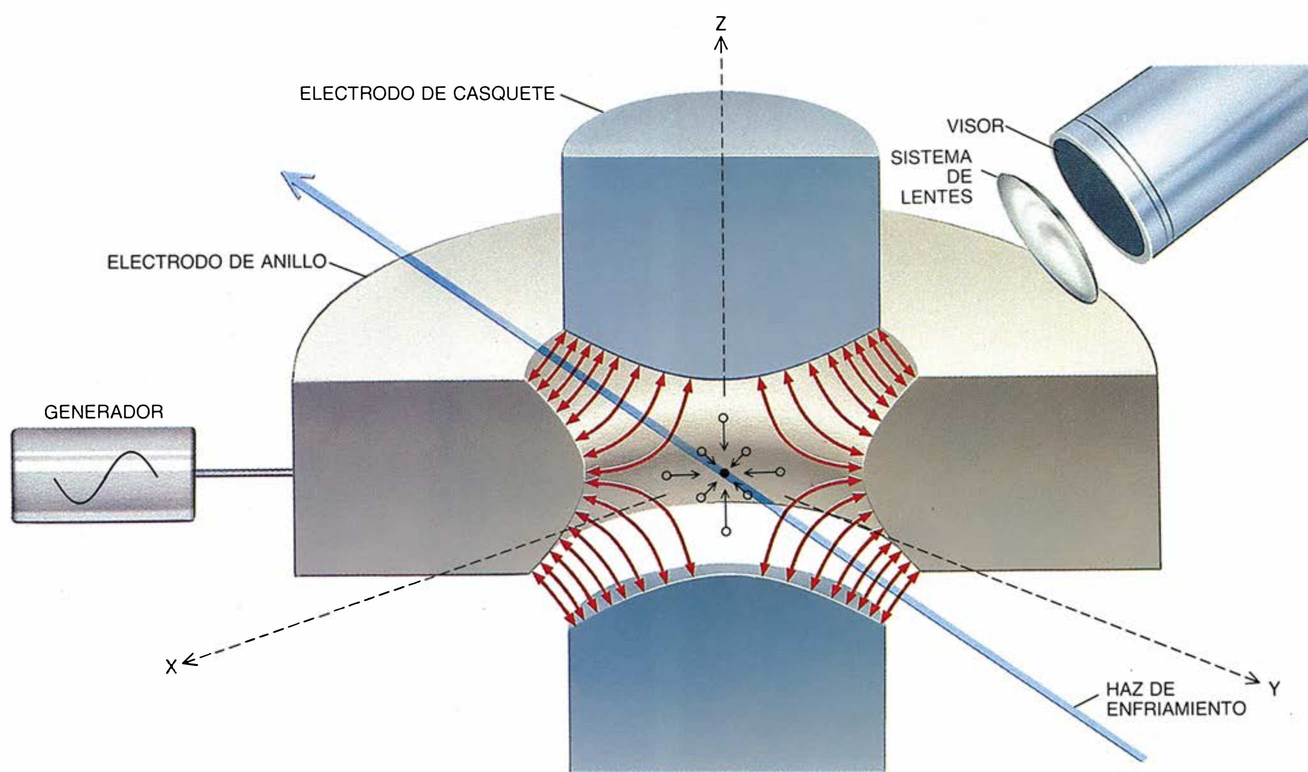
Estas predicciones teóricas para los plasmas de un componente corresponden a sistemas "infinitos", aquellos cuyas propiedades macroscópicas no cambian cuando se les añade o se les quita un gran número de iones. Además, las predicciones valen siempre que los iones del plasma se comporten clásicamente, es decir, siempre que puedan despreciarse los efectos de la mecánica cuántica. Ante condiciones de alta densidad y baja temperatura, la aproximación mecánico-cuántica puede adquirir interés, tal como examinó Eugene P. Wigner en 1934.

El universo nos ofrece ejemplos de plasmas de un componente fuertemente acoplados; de manera especial en los objetos estelares densos. Se espera que la corteza exterior de una estrella de neutrones (el remanente colapsado de una estrella grande que ha explotado como supernova) contenga de 10^{26} a 10^{29} átomos de hierro por centímetro cúbico: una densidad por lo menos 1000 veces mayor que cualquier objeto existente sobre la Tierra o en su interior. ¿Cómo se forma, en este entorno, un plasma de un componente fuertemente acoplado? La ingente presión ejercida en la corteza de la estrella rompe los átomos de hierro en núcleos de hierro y electrones libres. Los núcleos de hierro muestran un comportamiento clásico: el núcleo, dotado de carga positiva, repele a sus vecinos idénticos. Por otro lado, los electrones libres obedecen las leyes de la mecánica cuántica; en concreto, el principio de exclusión, a tenor del cual cada electrón debe ocupar un estado energético distinto. En razón de la alta densidad de los electrones de una estrella de neutrones, aquéllos se hallan, forzosamente, en estados energéticos muy elevados. Por tanto, los electrones no están afectados por el movimiento de los núcleos de hierro de bastante menos energía. Crean, en consecuencia, un fondo de densidad uniforme de carga negativa. Los núcleos móviles sobre el fondo de electrones forman un plasma de un componente cuyo acoplamiento se estima entre 10 y 1000.

Para conocer mejor estos plasmas naturales, los investigadores han intentado generar un plasma de un componente fuertemente acoplado en el laboratorio. Ahora bien, las propiedades termodinámicas de un plasma de un componente dependen sólo del acoplamiento; por consiguiente, un plasma de un componente que sea frío y difuso podrá gozar de las mismas propiedades que un plasma de un componente que sea caliente y denso. Sin embargo, hasta hace poco, los plasmas de un componente creados en el laboratorio no han alcanzado la suficiente densidad ni la baja temperatura necesarias para ser fuertemente acoplados. Por mor de comparación, en la corteza exterior de una estrella de neutrones la densidad de los núcleos de hierro es unos 20 órdenes de magnitud mayor que las densidades de iones normales en la trampa. Para crear un plasma de un componente cuyo acoplamiento equivalga al de una estrella de neutrones, los investigadores deben enfriar los iones cargados atrapados hasta una temperatura que sea aproximadamente nueve órdenes de magnitud menor que la estelar. Alcanzar un acoplamiento elevado exige temperaturas muy por debajo del kelvin.

Amén de conseguir un acoplamiento igual al de un sistema natural, el plasma de un componente de laboratorio debe incluir iones suficientes para revelar el comportamiento que caracteriza a la agrupación de muchos iones del sistema natural. Los físicos, que han dado ya el primer paso, están ahora trabajando en el segundo.

Ambos esfuerzos implican la técnica de las trampas electromagnéticas. Cuenta ésta con una historia de treinta años. En 1959, Ralph F. Wuerker, Haywood Shelton y Robert



2. TRAMPA DE PAUL para crear un campo eléctrico variable con el tiempo (*líneas rojas*) entre los electrodos. Cuando un generador aplica un voltaje variable al anillo, el campo eléctrico cambia de intensidad y dirección, pero su forma se mantiene constante. Las fuerzas ponderomotrices resultantes (*flechas negras*) confinan las partículas cargadas. Un haz láser dirigido hacia el centro mismo de la trampa enfría los iones y los analiza.

V. Langmuir, del departamento de investigación de la empresa Thompson Ramo-Wooldridge, en California, ensayaron una trampa electromagnética que confinaba partículas metálicas cargadas. Ese bello experimento puso de manifiesto los efectos provocados por el fuerte acoplamiento de las partículas. Desde entonces, los investigadores han atrapado electrones e iones [véase "El electrón aislado", por Philip Ekstrom y David Wineland; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1980].

En principio, una trampa electromagnética puede consistir en una esfera uniformemente llena de carga negativa. Cuando una partícula dotada de carga positiva se suelta dentro de la esfera, se ve empujada hacia el centro de la misma por la carga negativa, uniformemente distribuida. Al superar el centro, la partícula positiva experimenta una fuerza "recuperadora", que es proporcional a su distancia al centro, y que acaba por llevarla de nuevo hacia él. Mientras la partícula tenga libertad de moverse por la esfera, oscilará en torno al centro. Ahora bien, si la partícula positiva se enfría gradualmente —es decir, si pierde energía cinética—, oscilará sobre una distancia progresivamente menor, hasta que se coloque en el centro.

Los dispositivos prácticos pueden aproximarse a esta trampa ideal. En particular, dos tipos de trampas electromagnéticas —la de Paul y la de Penning— producen plasmas de un componente fuertemente acoplados.

La trampa de Paul consta de tres electrodos metálicos: un anillo y dos casquetes. El anillo está conectado a un generador cuyo voltaje fluctúa sinusoidalmente según la frecuencia directriz. Los electrodos se instalan en una cámara de vacío, a fin de asegurar que las moléculas de aire no colisionen con los iones.

¿De qué modo confina a los iones la trampa de Paul? El voltaje sinusoidal del anillo proporciona un campo eléctrico que varía con el tiempo entre el anillo y los casquetes. La dirección del campo alterna: la mitad del tiempo, el ion es atraído por el anillo y rechazado por los casquetes; la otra mitad, el ion es rechazado por el anillo y atraído por los casquetes. El ion vibra sinusoidalmente a la frecuencia directriz.

El ion experimenta constantemente una fuerza. Pero, debido a que esta fuerza varía sinusoidalmente con el tiempo, cabría esperar que la fuerza neta resultante sobre el ion fuera cero. En otras palabras, podría suponerse que el ion se moviera hacia adelante y hacia atrás, bajo la influencia del campo eléctrico oscilante, y que el centro de su oscilación permaneciera fijo en el tiempo. ¿Qué es, pues, lo que dirige al ion hacia el centro de la trampa?

La respuesta radica en los electrodos; por causa de la forma de éstos, el campo eléctrico es más débil en el centro de la trampa que cerca de los electrodos. La consideración de un caso especial nos permitirá hacernos una idea básica acerca de cómo la variación espacial del campo afecta al ion. Supongamos que, durante un tiempo, el movimiento sinusoidal forzado de los iones está centrado más cerca del casquete superior que del inferior. Cuando el ion se halla en la parte superior de su oscilación, experimenta una fuerza intensa hacia el centro de la trampa. Cuando está en la parte inferior de su oscilación, la fuerza impulsa hacia el casquete superior, pero es algo más débil. Por tanto, el ion experimenta una fuerza neta resultante hacia el centro de la trampa: la fuerza ponderomotriz.

De la misma manera, el ion sufrirá una fuerza ponderomotriz que tenderá a dirigirlo hacia el centro de la trampa cuando oscile por debajo del centro o por los lados. En la dirección vertical, la fuerza ponderomotriz se llama fuerza axial; en la dirección lateral, fuerza radial.

Entonces, en todo tiempo, un ion de la trampa experimenta dos fuerzas: la fuerza directriz y la fuerza ponderomotriz. Resulta que la fuerza ponderomotriz axial es mayor que la fuerza ponderomotriz radial; por tanto, un ion oscila con tres frecuencias características: la directriz, la radial y la axial. Suele diseñarse la trampa de suerte tal que las frecuencias ponderomotrices radial y axial sean unas 10 veces menores que la frecuencia directriz. En consecuencia, el movimiento provocado por la fuerza directriz será una vibración pequeña y rápida, superpuesta a una oscilación grande y lenta en torno al centro de la trampa, ocasionada por la fuerza ponderomotriz.

Si se desprecia la oscilación menor y más rápida provocada por la fuerza directriz, el ion de la trampa de Paul se mueve como lo haría en el interior de una esfera cargada negativamente. Ahora bien, por ser distinta en la dirección axial la fuerza ponderomotriz, resulta más apropiado imaginar la trampa de Paul a modo de esferoide aplastado (en forma de tarta), o alargado (en forma de puro). Para controlar la forma del esferoide y las fuerzas combinadas sobre los iones, podemos aplicar un voltaje adicional constante entre el anillo y los casquetes. Cuando la fuerza radial resultante sea mayor que la fuerza axial, la trampa actuará como un esferoide alargado. Inversamente, cuando la fuerza radial sea menor que la fuerza axial, la trampa actuará como un esferoide aplastado. Así, la trampa de Paul puede, a la vez, confinar los iones en el centro y orientar el conjunto en la dirección axial o en la radial.

En 1987, trabajando en el Instituto Nacional de Normalización y Tecnología con James C. Bergquist, Wayne M. Itano y Charles H. Manney, utilizamos una trampa de Paul para observar microplasmas fuertemente acoplados de iones de mercurio. Por la misma fecha, los grupos dirigidos por Herbert Walther y Frank Diedrich, del Instituto Max Planck de Física del Plasma en Garching, por Richard G. Brewer, del Centro Almadén de Investigación de IBM, en San José, California, y por Peter E. Toschek, de la Universidad de Hamburgo, estaban acometiendo experimentos parecidos con varias clases de iones.

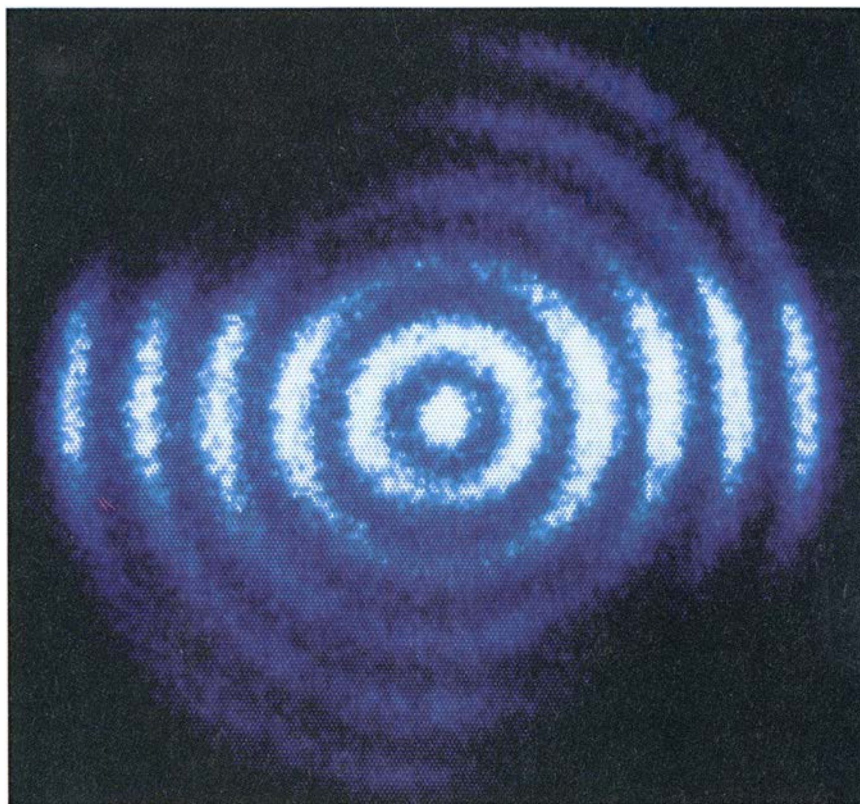
Al inicio de nuestro experimento, dejamos que una pequeña cantidad de vapor de mercurio se escapara dentro del sistema de vacío que contenía la trampa de Paul. Conforme los átomos de mercurio pasaban por la trampa, recibían el bombardeo de un haz de electrones. Los electrones del haz tenían justo la energía suficiente para arrancar un solo electrón de cualquier átomo de mercurio con el que chocaran, ionizando, por tanto, el átomo.

Para enfriar los iones, nos apoyamos en la técnica del enfriamiento láser [véase "Enfriamiento y confinamiento de átomos", por William D. Phillips y Harold J. Metcalf; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1987]. Generamos un haz láser cuya frecuencia era ligeramente menor que la que los iones pudieran absorber con facilidad. Sin embargo, los iones que se dirigían hacia la fuente láser "veían" la frecuencia ligeramente aumentada, a causa del efecto Doppler. Estos iones absorbían fuertemente la luz y se frenaban. Los iones que se alejaban de la fuente encontraban la luz a una frecuencia disminuida; en consecuencia, absorbían débilmente la luz y no se aceleraban mucho. En conjunto, el movimiento medio de los iones remitía: los iones se enfriaban.

Para observar los iones de mercurio individuales y sus estructuras espaciales, los iluminamos con luz ultravioleta, que los iones de mercurio dispersan de forma drástica. Una cámara de vídeo ultravioleta registró hasta 100.000 fotones por segundo de

luz ultravioleta; generó, pues, una película de los iones atrapados. La cámara podía resolver detalles del tamaño de una micra (una millonésima de metro).

Al principio, trabajamos con un solo ion de mercurio en la trampa y lo enfriamos a temperaturas de un milikelvin. La fuerza ponderomotriz confinó el ion en el centro de la trampa. Cuando introdujimos en la trampa dos iones, descubrimos dos configuraciones posibles. Si la fuerza ponderomotriz radial era más fuerte que la axial, los dos iones se alineaban en la dirección axial, de manera que quedaban a igual distancia del centro de la trampa. Por contra, si la fuerza ponderomotriz radial era más débil que la fuerza axial, los iones orbitaban en torno al eje de la trampa en un plano radial. A medida que añadimos más iones en la trampa, nuestra intuición acerca de las localizaciones de los iones empezó a tambalearse. Menos mal que, con la asistencia de un ordenador que tuviera en cuenta las numerosas fuerzas y los múltiples iones, Itano simuló varias condiciones en la trampa y predijo con precisión las configuraciones de los iones resultantes.

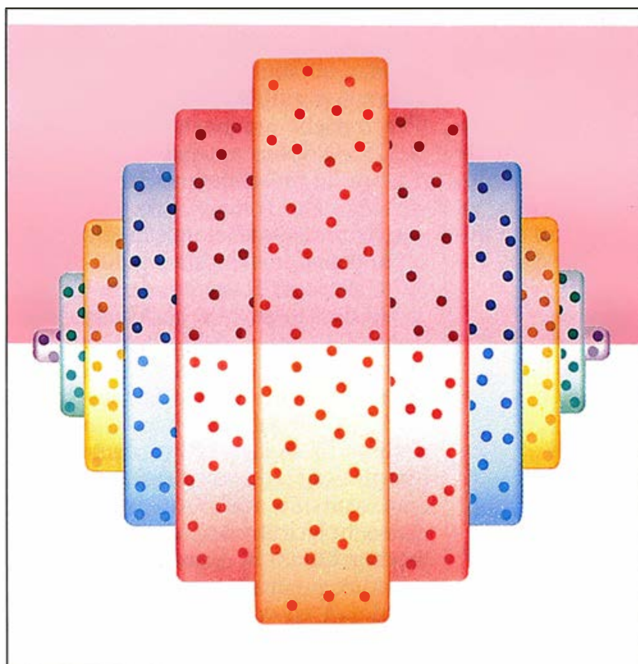


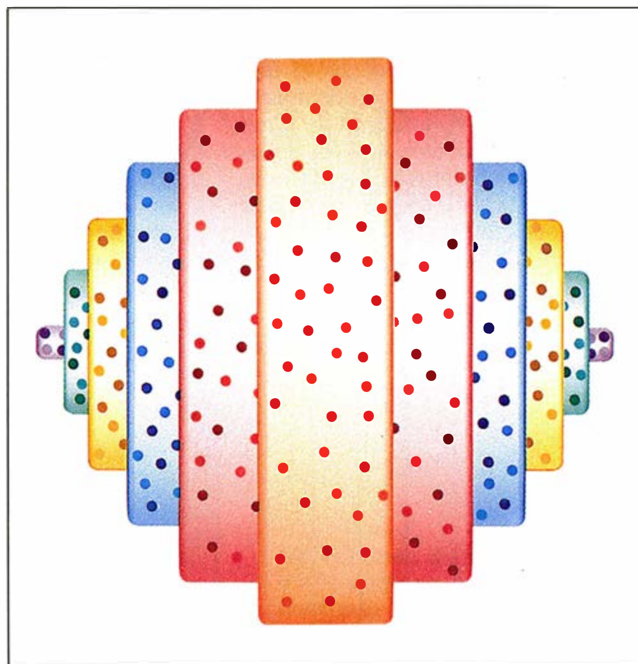
El confinamiento de iones nos permitió confirmar que una trampa de Paul podía mantener un plasma de un componente. Aunque los iones estaban acoplados fuertemente, así lo demostraba la estructura espacial observada, necesitábamos calcular el acoplamiento a partir de las mediciones de densidad y temperatura. Las imágenes nos facilitaban establecer la densidad de los iones, pero hubo que medir la temperatura por vías indirectas. Observamos (tal como lo habían hecho muchos otros grupos en otros experimentos) que el movimiento de los iones modificaba el espectro de absorción asociado a los mismos. (El espectro de absorción de un átomo o molécula revela las frecuencias de radiación absorbidas con mayor intensidad por el átomo o la molécula.)

Un conjunto de iones absolutamente estacionarios tendría un espectro de absorción muy agudo, señal de que la absorción sólo se producía a frecuencias bien definidas. Por otro lado, si los iones presentaban cierto grado de movimiento, el espectro de absorción se difuminaría. El difuminado débese al movimiento de los iones, que se acercan y alejan de la fuente de radiación. Ahora bien, desde el punto de vista de los iones, es la fuente la que se está moviendo hacia ellos, o alejándose, de manera que la frecuencia de la luz se encuentra desplazada por el efecto Doppler. Así, los iones que avanzan hacia la fuente serán capaces de absorber radiación de frecuencias ligeramente menores con mayor eficacia que lo que podrían los iones estacionarios; por su parte, los iones que se alejan de la fuente podrán absorber radiación de frecuencias ligeramente mayores. La combinación de muchos iones que se mueven en múltiples direcciones produce el efecto de "difuminar" el espectro; el grado de difuminado revela la temperatura de los iones. Esta técnica mostró que la temperatura de los iones en nuestra trampa era de unos 10 milikelvin. El acoplamiento era, entonces, de hasta 500.

Estas mediciones de los acoplamientos, que indicaban que la trampa de Paul podía mantener un plasma de un componente fuertemente acoplado, se hicieron con menos de 25 iones en el dispositivo. Nos costó crear estados sólidos similares con más iones. La dificultad surgía de los efectos de la oscilación inducida en los iones por la fuerza directriz. Como un ion oscila a la frecuencia directriz, la repulsión entre él y sus vecinos le permite influir sobre las oscilaciones de los otros iones. Esta perturbación adicional puede hacer que la estructura del plasma se caliente hasta un punto de ruptura, bajo ciertas condiciones de trabajo de la trampa. El efecto se conoce como calentamiento de radiofrecuencia, debido a que la frecuencia directriz de los iones atómicos viene a ser la misma que la frecuencia de las ondas de radio. El calentamiento de radiofrecuencia se observó en los experimentos de Wuerker, Shelton y Langmuir.

Más recientemente, Reinhold Blümel y sus colaboradores, del Max Planck, y John A. Hoffnagle y sus colaboradores, de IBM, han estudiado el calentamiento de radiofrecuencia de los iones atómicos. De acuerdo con sus investigaciones, un pequeño cambio en los parámetros del sistema de la trampa de Paul puede provocar una transición repentina entre estados fríos cristalinos y estados gaseosos calientes. Por ejemplo, la velocidad con la que los iones se enfrían es muy sensible a la frecuencia de la luz láser empleada en el enfriamiento. Si el láser se sintoniza muy por debajo de la frecuencia de enfriamiento óptima, el calentamiento de radiofrecuencia transforma el plasma de iones en un estado caliente desordenado. Si la frecuencia del láser aumenta, crece la velocidad del enfriamiento láser, hasta que, a una frecuencia crítica, el láser enfría el plasma de iones lo suficientemente deprisa como para que empiece a aparecer cierto orden. En dicho punto, el calentamiento de radiofrecuencia disminuye drásticamente y el plasma de iones se congela, de forma repentina, en un estado ordenado. Este





3. ESTRUCTURA EN CAPAS DE UN MICROPLASMA de unos 1000 iones de berilio. Se pone de manifiesto mediante una fotografía (*la de la página opuesta*) realizada con un haz láser que atraviesa el microplasma y registrando la fluorescencia resultante. Las ilustraciones ponen de manifiesto la estructura en capas completa, así como la difusión de los iones de berilio de un momento (*centro*) al siguiente (*derecha*). El microplasma se comporta, a la vez, como sólido y como líquido: los iones (*puntos coloreados*) se desplazan por el interior de las capas, pero no entre ellas.

estado congelado es bastante estable y persistirá, incluso si la frecuencia del láser disminuye de nuevo un poco. La naturaleza irregular del calentamiento de radiofrecuencia hace difícil estudiar las transiciones de fase líquido-sólido predichas para los plasmas de un componente.

El problema del calentamiento de radiofrecuencia aumenta cuando lo hace el número de iones en la trampa. Si hay muchos iones en la trampa, algunos viajan hacia los electrodos, donde la fuerza directriz es más intensa. Estos iones oscilan entonces a la frecuencia directriz con una amplitud grande y aumentan, por tanto, los efectos del calentamiento de radiofrecuencia. Estas consideraciones han limitado el número de iones que pueden enfriarse a la vez en una trampa de Paul a unos 200. Si se pueden superar las dificultades asociadas al calentamiento de radiofrecuencia, la trampa de Paul permitiría a los investigadores estudiar la transición de fase líquido-sólido, así como otras propiedades del plasma de un componente "infinito".

La trampa de Penning proporciona hoy un entorno, más adecuado que la trampa de Paul, para experimentar con grandes plasmas de un componente fuertemente acoplados. Contrariamente a los campos eléctricos, variables con el tiempo, de la trampa de Paul, los campos eléctricos y magnéticos que confinan las partículas cargadas en la de Penning son estáticos. En 1988, con Sarah L. Gilbert construimos una trampa de Penning para confinar iones de berilio. Malmberg y sus colaboradores han empleado una trampa del tipo de Penning para confinar plasmas de electrones fuertemente acoplados.

Nuestra trampa consistía en cuatro electrodos cilíndricos colocados, un extremo contra el otro, a lo largo de un eje común [*véase la figura 5*]. Se aplicó un voltaje positivo a los dos electrodos cilíndricos exteriores. Este voltaje generó un campo eléctrico entre cada electrodo interno y el electrodo externo adyacente. Los campos atrapaban los iones en la dirección axial, cerca de un plano situado entre los electrodos internos.

Un imán potente colocado alrededor de los electrodos creaba un campo magnético uniforme dirigido a lo largo del eje de los cilindros. El campo magnético evitaba que los iones abandonaran la trampa en la dirección radial. La fuerza radial del campo eléctrico cerca del centro de la trampa procede en una dirección que se aleja del centro de la trampa. Esta fuerza se combina con el campo magnético axial para provocar que los iones orbiten en torno al eje de la trampa. Cuando los iones orbitantes atraviesan el campo magnético, experimentan una fuerza de Lorentz que se dirige radialmente hacia dentro. La fuerza de Lorentz confina los iones radialmente.

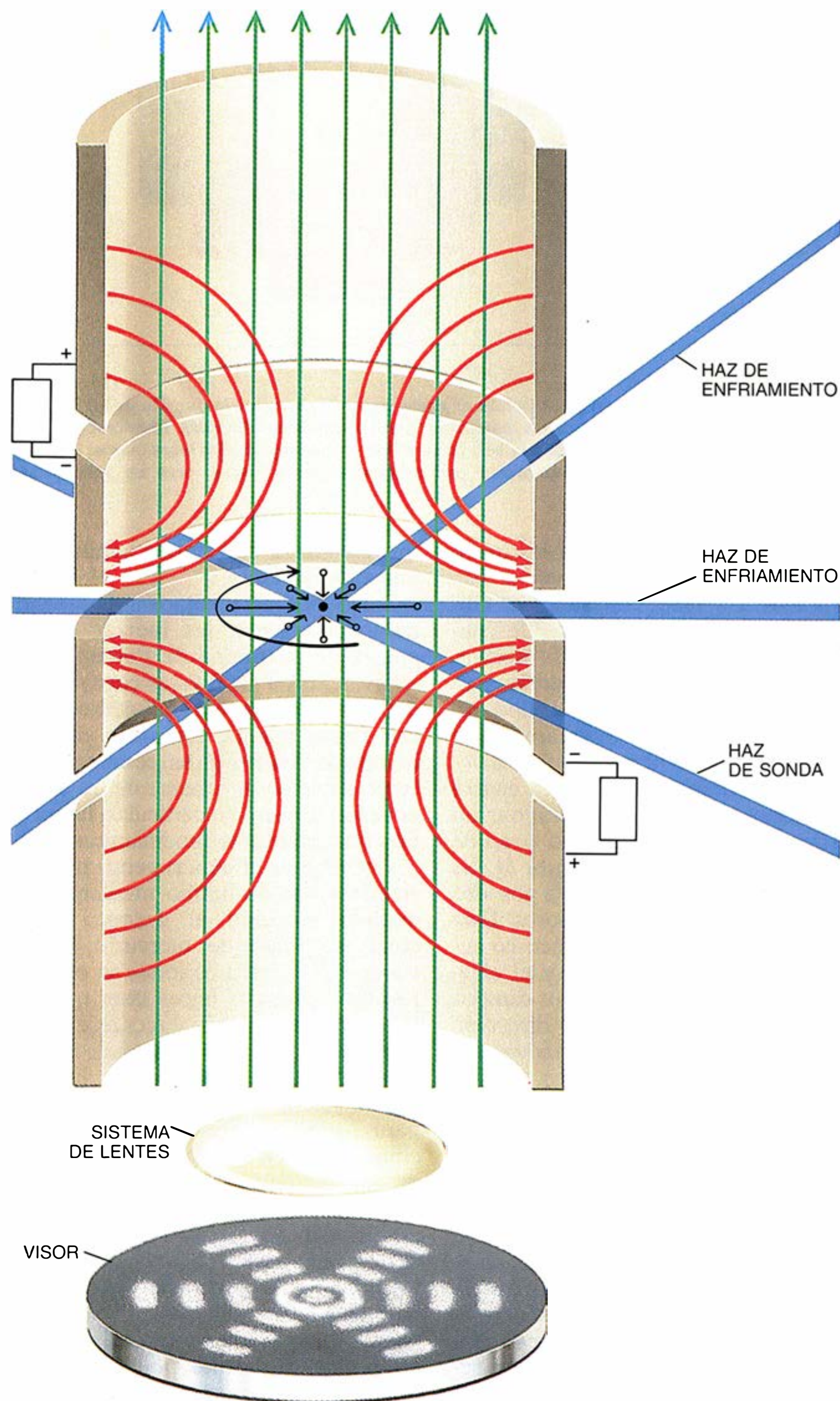
Salvo por esta rotación uniforme del microplasma, las fuerzas confinantes de la trampa de Penning son equivalentes a las fuerzas confinantes del esferoide cargado uniformemente. Por tanto, aunque los iones en una trampa de Penning giren, se comportan como iones de un plasma de un componente; poseen, en particular, las mismas propiedades termodinámicas.

Abordamos el experimento produciendo iones de berilio mediante un método parecido al descrito para crear los iones de mercurio en la trampa de Paul. Los iones se enfriaron mediante dos haces láser que se interseccionaban. Un tercer haz láser, llamado sonda, se utilizó para medir la temperatura de los iones. La luz dispersada por los iones se recogió para formar un espectro de absorción. Como en el experimento de iones de mercurio, la temperatura de los iones podía deducirse a partir del difuminado de ciertas características del espectro. Esta técnica reveló que los iones se habían enfriado por debajo de los 10 milikelvin.

La frecuencia de rotación del microplasma de berilio podía también deducirse del espectro. Los iones de berilio circulaban por el interior de la trampa con una velocidad comprendida entre unas 20.000 y 200.000 rotaciones por segundo. Como la frecuencia de rotación guarda directa re-

lación con los campos eléctricos radiales, relacionados, a su vez, con la densidad de iones, calculamos que la densidad de iones estaba comprendida entre 50 y 300 millones de iones por centímetro cúbico. A partir de las imágenes ultravioletas de los plasmas, determinamos el volumen ocupado por los iones atrapados y, por tanto, el número de iones atrapados. Las mediciones de la temperatura y la densidad dieron acoplamientos elevados, de 200 a 400, para menos de unos 15.000 iones en la trampa.

Esperamos que tenga lugar una transición de fase desde un estado de tipo líquido hacia otro de tipo sólido, a un acoplamiento de 180 para un plasma de un componente con un número infinito de iones. Nuestros valores medidos del acoplamiento señalan que los iones atrapados han de formar un sólido iónico cristalino, si la trampa contiene suficientes iones. Pero, ¿debe comportarse un sistema de 15.000 iones atrapados como si se tratara de un sistema infinito?



4. TRAMPA DE PENNING para generar campos eléctricos (*líneas rojas*) y campos magnéticos (*líneas azules*) que produzcan fuerzas (*flechas*) confinadoras de las partículas dotadas de carga. Los campos eléctricos y magnéticos provocan también la rotación del microplasma. Dos haces láser enfrían las partículas; un tercero sirve de sonda para varios experimentos. El campo magnético lo crea una corriente eléctrica que fluye por un solenoide (no se indica en la figura) que rodea la trampa.

Algunas simulaciones mediante ordenador han dilucidado la cuestión. Aneesur Rahman, de la Universidad de Minnesota, en Minneapolis, John P. Schiffer, del Laboratorio Argonne, Hiroo Totsuji, de la Universidad de Okayama, y Daniel H. E. Dubin y O'Neil, de la Universidad de California en San Diego, han creado simulaciones de un plasma atrapado que contiene varios miles de iones. Las simulaciones sacan a la luz varios hechos notables. Cuando los acoplamientos superan la unidad, los iones se alojan en capas concéntricas, que guardan intervalos regulares. Para acoplamientos en torno a 10, las capas se hallan en un estado líquido caracterizado por un ordenamiento de corto alcance y una difusión en todas direcciones. Cuando el acoplamiento aumenta, las capas se definen con mayor nitidez; los iones se difunden rápidamente dentro de las capas y poco a poco entre las mismas. Para acoplamientos elevados (por encima de 200), la difusión de los iones en el seno de una capa se reduce y forman un estado de tipo sólido. En vez de mostrar una transición de fase brusca, el plasma evoluciona gradualmente desde un estado de tipo líquido hacia otro de tipo sólido.

Los experimentos han confirmado estas predicciones. Aun cuando los iones del plasma de berilio giren en torno al eje de la trampa de Penning, la estructura de capas se mantiene en la dirección radial. La luz dispersada de un haz láser que atraviese el plasma muestra bandas alternantes, brillantes y oscuras, que corresponden a las capas. Procedimos a la búsqueda de estructura en capas de los plasmas que contenían o sólo 20 iones o 15.000. En el plasma de 20 iones, se observó con toda claridad una sola capa. En el plasma de 15.000 iones, distinguimos 16 capas. Hasta ahora, no hemos detectado ninguna estructura nítida en el interior de una capa por culpa de la rotación del plasma en la trampa.

Logramos comprobar la predicción siguiente: para acoplamientos en torno a 100, el plasma se comportaría como líquido en el seno de una capa y, como sólido, entre capas. En particular, los iones se difundirían más deprisa dentro de las capas que entre ellas. Para demostrar el efecto, "sellamos" los iones con una etiqueta óp-

tica: sintonizando el láser sonda a una frecuencia determinada. El láser sonda suprime la emisión de luz de los iones con los que colisiona y los deja en un estado de energía "oscuro", en el que no dispersan luz de los haces láser de enfriamiento.

Primero oscurecimos una capa exterior del plasma. Medimos, entonces, el tiempo necesario para que los iones oscuros de la capa exterior se movieran hacia las capas interiores. Oscurecimos, luego, parte del plasma que contuviera varias capas, y medimos el tiempo necesario para que los iones oscuros de una parte se desplazaran al resto. Estas mediciones comprobaron que, para acoplamientos moderados, la difusión de iones entre capas procedía con una lentitud de 10 veces mayor que la difusión de los iones en el interior de una sola.

Muchas preguntas acerca de los microplasmas esperan aún respuesta. ¿En qué punto empezará a aparecer el comportamiento que define a un sistema infinito? ¿Cuántos iones se necesitan para que el sistema presente una transición de fase brusca? ¿En qué estadio se convertirá el estado sólido en una red cúbica centrada, en vez de limitarse a formar un conjunto de capas?

Son cuestiones de solución difícil, incluso en teoría. A pesar de ello, Dubin sugiere que quizá se necesiten 50 o 60 capas antes de que una red cúbica centrada se convierta en una configuración energéticamente favorable. Esto exigiría en torno a un millón de iones, más de 50 veces el número de iones de los mayores microplasmas fuertemente acoplados creados hasta ahora. La técnica actual debería ser capaz de confinar plasmas de semejante tamaño. Si pueden mantenerse acoplamientos de 200 o más para un plasma de un millón de iones, podríamos, a lo mejor, visitar la superficie de una estrella de neutrones en un laboratorio terrestre.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NON-NEUTRAL PLASMA PHYSICS. Dirigido por C. W. Roberson y C. F. Driscoll. AIP Conference Proceedings 175, Instituto Americano de Física, marzo de 1988.

PROCEEDINGS OF THE ELEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATOMIC PHYSICS, JULY 4-8, 1988, en *Atomic Physics 11*. Dirigido por S. Haroche, J. C. Gay y G. Grynberg. World Scientific Publishing Co., 1989.

PROCEEDINGS OF THE YAMADA CONFERENCE ON STRONGLY COUPLED PLASMA PHYSICS, AUGUST 29-SEPTEMBER 2, 1989. Dirigido por Setsuo Ichimaru. Elsevier Science Publishers, en prensa.

La física de superficies

Los avances recientes de la física de superficies están produciendo una avalancha de conocimientos, básicos y aplicados, sobre el comportamiento atómico en el universo en dos dimensiones de las superficies sólidas

Rodolfo Miranda

El ser humano se ha sentido siempre fascinado por la superficie de las cosas. Es fácil rastrear en los antiguos testimonios de primitivos científicos, como los adivinos sumerios o los alquimistas medievales, su preocupación por entender el papel de las superficies en el comportamiento cotidiano de las cosas. En el Museo Británico de Londres se guarda lo que probablemente constituye la prueba escrita más antigua de esta atávica curiosidad: una tablilla de la época de Hammurabi, en la que se encuentra, grabada en escritura cuneiforme, una descripción detallada de las formas cambiantes de la interfase entre aceite y agua que los adivinos sumerios utilizaban para predecir el curso futuro de campañas guerreras u operaciones comerciales.

Las aplicaciones prácticas de este conocimiento empírico son, asimismo, antiguas. Ya Plinio describió, con todo pormenor, cómo calmar las olas del mar arrojando pequeñas cantidades de aceite sobre su superficie. Los primeros ensayos sistemáticos que señalaban la importancia de los tratamientos superficiales estaban relacionados con la orfebrería, como la relatada en el manuscrito *De proprietatibus rerum*, redactado aproximadamente en 1252: "Si se desea unir rígidamente una placa de oro con otra de plata, antes de golpearlas con el martillo, debe uno precaverse contra el viento, el polvo y la humedad, porque si alguna de estas tres cosas se introdujera entre el oro y la plata, no se podrá juntarlas".

RODOLFO MIRANDA dirige el laboratorio de física de superficies en el departamento de física de la materia condensada de la Universidad Autónoma de Madrid (LASUAM). Recibió el doctorado por la UAM en 1980. Se formó posteriormente en Alemania. Desde 1986 ocupa el cargo actual. Miranda quiere expresar su agradecimiento a todos los miembros del LASUAM por su colaboración en la preparación de este artículo, especialmente a J. de la Figuera y J. L. Martínez - Albertos por su ayuda en la confección de las figuras.

En el curso del enorme avance científico que tuvo lugar en el siglo pasado se pusieron las bases para dos de las aplicaciones más importantes, todavía hoy, de la ciencia de superficies. En 1833, Michael Faraday realizó unos cuidadosos experimentos que le permitieron adelantar una explicación del misterioso efecto que producía el platino sobre la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno, induciéndola a temperaturas muy inferiores a la de combustión. Faraday sentó así los fundamentos de nuestra comprensión actual de la acción catalítica de las superficies sólidas. En 1873, Karl Ferdinand Braun observó, por su parte, que la unión entre una punta afilada metálica y cristales de semiconductores compuestos (el sulfuro de hierro o plomo) presentaba propiedades rectificadoras, esto es, que la corriente eléctrica circulaba mejor en una dirección que en la opuesta. El joven Braun (tenía 24 años en ese momento) atribuyó ese comportamiento a la existencia de una capa delgada en la interfase entre ambos materiales. Este descubrimiento es la base de los diodos y transistores presentes en toda la electrónica moderna. Braun recibió el premio Nobel de física en 1909, junto con Marconi, por el desarrollo de los rectificadores de estado sólido que condujo a la telegrafía sin hilos.

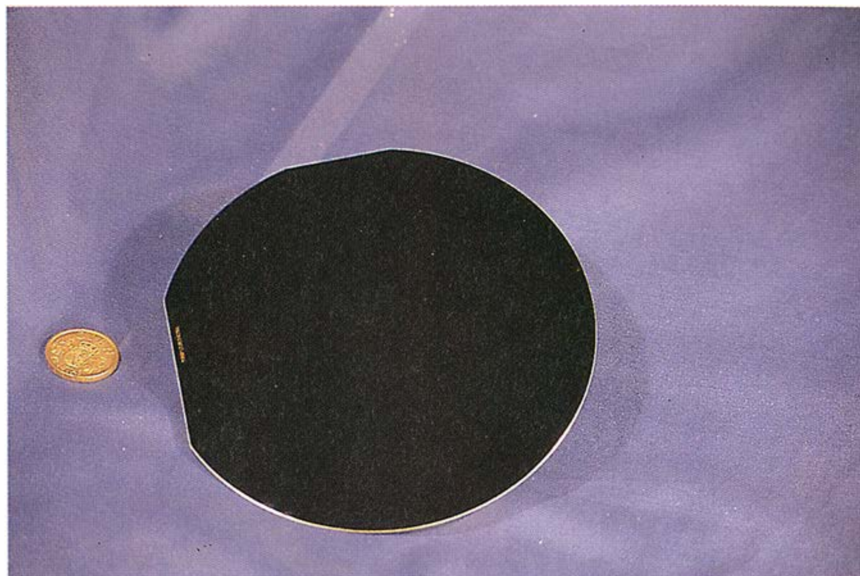
Ya en nuestro siglo se produjeron dos avances importantísimos en el desarrollo de la física de superficies. Philip Lenard puso a punto técnicas espectroscópicas que aprovechaban el efecto fotoeléctrico (descubierto por Hertz en 1887 y cuya explicación le valió a Einstein el premio Nobel en 1921) y Clinton Davisson descubrió la difracción de electrones (por lo que fue galardonado con el Nobel en 1937). Ambos fenómenos están relacionados con notables propiedades de la superficie, como ya sus respectivos descubridores observaron. De hecho, hoy en día, constituyen el fundamento de dos técnicas habituales para determinar la estructura electrónica y geométrica, respectivamente, de las superficies: la espectroscopía de fotoelectrones y la difracción de electrones de baja energía [véase "Estructuras atómicas de superficies sólidas", por P. M. Echenique y M.H. van Hove; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1979].

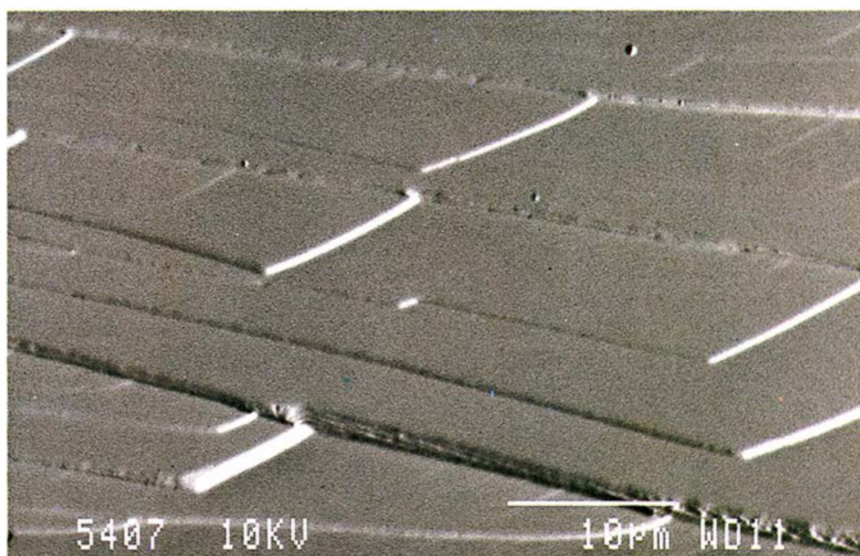
Sin embargo, es Irving Langmuir, ilustre físico estadounidense que recibió el premio Nobel en 1932, el que es considerado padre de la física de superficies moderna. En efecto, en las décadas entre las dos guerras mundiales, Langmuir realizó una ingente labor creando los métodos experimentales de alto vacío, los cuales le permitieron abordar problemas básicos, como la reducción en la función de trabajo producida por la absorción de metales alcalinos sobre superficies metálicas, la emisión termoiónica o los mecanismos de quimisorción. Sus amplios intereses científicos le llevaron a brillantes aplicaciones de sus descubrimientos, como las lámparas incandescentes de atmósfera inerte, básicamente idénticas a las que se emplean hoy en día. Suya es la principal responsabilidad de haber elevado la física de superficies a la categoría de disciplina con entidad propia.

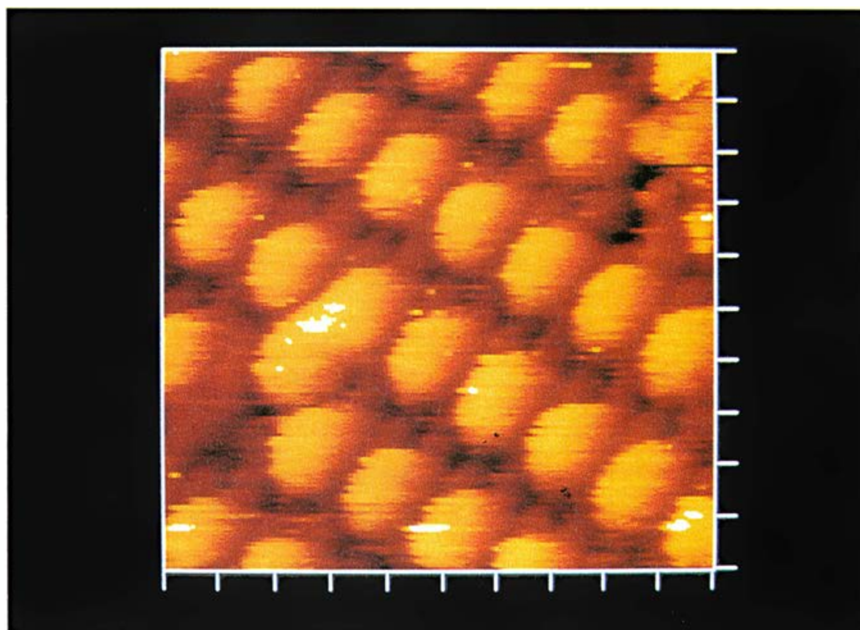
Si éste fue el nacimiento de la especialidad, el acontecimiento decisivo que desencadenó un enorme interés por la física fundamental de las superficies de semiconductores recayó en el descubrimiento del transistor de contacto puntual por Bardeen y Brattain, seguido por el del transistor de unión *p-n* por Shockley en diciembre de 1947. En la postguerra, atraídos por la indudable importancia de las aplicaciones prácticas, los físicos teóricos del estado sólido trataron de comprender las propiedades de las superficies de los sólidos. Así, mientras

Nevill Mott (premio Nobel en 1977) sugería una explicación de los fenómenos en la unión metal-semiconductor, Nicolás Cabrera, entonces en la Universidad de Bristol, con la ayuda de su colaborador W. K. Burton elaboró en 1949 una teoría refinada del crecimiento cristalino, todavía utilizada. Pero fue, sin duda, el desarrollo técnico derivado de la carrera espacial lo que posibilitó en la década de los sesenta la existencia de campanas de vacío comerciales, en las que, por primera vez, era posible limpiar la superficie y mantenerla en condiciones controladas. En 1969 Harris introdujo la espectroscopía de electrones Auger, que permite determinar la composición química de una superficie con una sensibilidad del orden del 1 por ciento de una capa atómica.

Desde la década de los setenta, la física de superficies ha emergido como un ejemplo emblemático de revolución científica según el conocido arquetipo de Thomas Kuhn, historiador de la ciencia. El cambio en nuestra visión del mundo que comporta toda revolución científica es, en este caso, la aparición de la región material de la interfase entre dos medios como una entidad autónoma. Un estado de la materia con sus propias leyes, composición química, estructura geométrica, estados electrónicos y dinámica atómica. Este cambio conceptual ha ido acompañado en la década de los ochenta por un altísimo refinamiento de las técnicas experimentales y un número creciente de investigadores dedicados a ella, por la realización de cuantiosas inversiones y por la proliferación de especialidades científicas (física de la materia condensada, ciencia de materiales, microelectrónica, optoelectrónica, catá-







1. NUESTRA APRECIACION de la estructura superficial se modifica drásticamente al observarla a magnificaciones crecientes. Los científicos han desarrollado continuamente instrumentos que nos permiten observar las superficies que nos rodean con un nivel de detalle cada vez mayor. Toda una generación de microscopios han sido los responsables fundamentales de esta tarea. Una oblea de silicio monocristalina (*arriba*), utilizada en la industria microelectrónica, presenta a simple vista el aspecto de un espejo perfecto. En el microscopio electrónico de barrido, la superficie de un monocristal de semiconductor (*centro*) es una sucesión de terrazas planas de varias micras de tamaño promedio. (Foto cortesía de Joaquín Ibáñez del CENIM.) Por fin, el microscopio de efecto túnel, el más exquisito de los microscopios disponibles, nos muestra a la escala atómica los detalles estructurales de una superficie de un monocristal metálico (*abajo*) que ha sido recubierta con una sola capa atómica de azufre. En esta imagen, tomada por Amadeo L. Vázquez de Parga, adscrito al laboratorio de superficies de la UAM, se observa una colección asombrosamente regular de átomos de azufre.



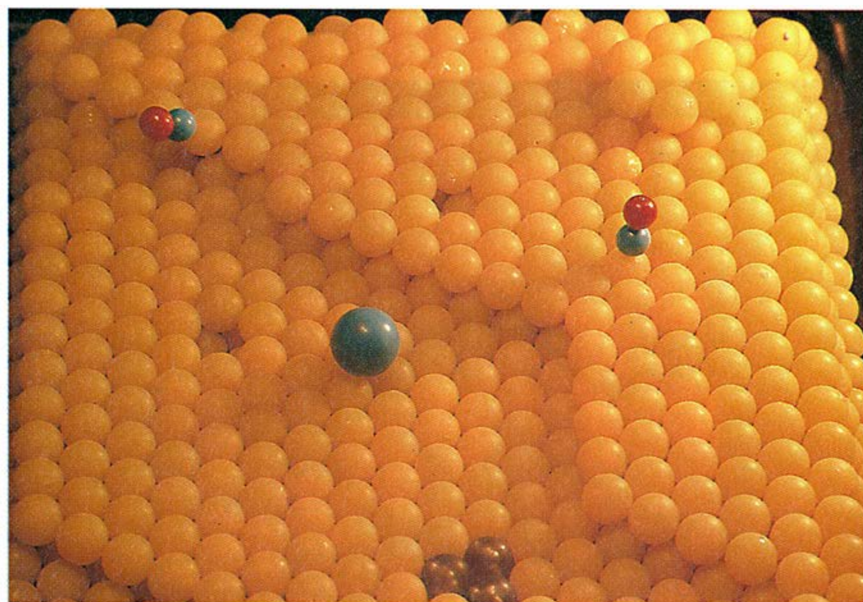
2. SISTEMA DE ULTRA ALTO VACIO (UAV) típico. Una serie de bombas de vacío eliminan las moléculas del ambiente hasta conseguir una presión en el interior de la campana del orden de 10^{-13} atmósferas (equivalente a la presión en la superficie de la Luna) de modo que la superficie de la muestra pueda ser mantenida limpia durante el tiempo necesario para realizar los experimentos.

lisis, quimico-física, electroquímica, etcétera) que se han visto enriquecidas por los desarrollos recientes de la física de superficies.

Pero, ¿qué es una superficie? Entre dos medios cualesquiera (sólido-gas, sólido-líquido, sólido-sólido, etcétera) siempre existe una zona superficial o interfacial que los separa. Esta región tiene propiedades mecánicas, de composición o electrónicas distinguibles de los medios que la flanquean. El espesor de la zona que debemos considerar superficie o interfase depende del tipo de propiedades a que nos estemos refiriendo. A veces puede ser estrictamente una sola capa atómica, mientras que en otras ocasiones puede extenderse decenas o incluso cientos de capas. Si nos ceñimos a la interfase sólido-vacío, de la que poseemos mayor información en la actualidad, es sabido que tanto la disposición geométrica de los átomos de la superficie del sólido como los estados electrónicos pueden diferir notablemente de los del volumen. La región de la superficie puede tener una composición química distinta de la del interior del sólido. La superficie expuesta a la atmósfera, por ejemplo, está cubierta por capas de contaminación debido a las reacciones con los gases y vapores de ésta. Normalmente se forman óxidos y a menudo sulfuros, carbonatos u otros compuestos, según sean el substrato y el ambiente. Además, la superficie puede presentar trazas de materiales que han estado en contacto previo con ella. Así, una superficie ordinaria, aunque esté limpia a simple vista, es, en realidad, un complejo sistema de componentes químicos y restos de impurezas. Por ello, se acostumbra distinguir las superficies "reales" de las "ideales", atómicamente limpias, en el sentido de no tener material extraño adherido a ellas.

La naturaleza de las superficies reales reviste un enorme interés práctico. La mayoría de las aplicaciones en que están comprometidas las superficies (lubricación, corrosión o rozamiento) requieren una comprensión de las propiedades de las superficies reales. Con este fin se han desarrollado múltiples métodos no destructivos de análisis químico que permiten obtener la composición atómica de la superficie de un material sólido con alta resolución lateral [*véase la figura 4*].

Sin embargo, la explosión de actividad en la física de superficies registrada desde de los años setenta ha tenido como objetivo fundamental el estudio de superficies monocristalinas y atómicamente limpias. ¿Por qué se estudian estas superficies casi ideales? ¿Por qué se ha desarrollado para ello un amplio abanico de técnicas experimentales de refinada complejidad? En primer lugar, porque nuestra capacidad para preparar superficies altamente perfectas ha abierto la posibilidad de explorar un *universo en dos dimensiones*. Esto es algo fascinante. Según se cree hoy, la dimensionalidad desempeña un papel clave en la teoría moderna de muchos fenómenos colectivos. Por ejemplo, en una transición de fase continua el comportamiento crítico depende sólo de la simetría del sistema, la dimensionalidad del parámetro de orden y la dimensionalidad del espacio. Esta propiedad se llama universalidad y sugiere que pueden suceder cosas interesantes en la superficie donde la dimensionalidad efectiva es dos, no tres. De hecho, gracias al método del grupo de renormalización [véase "Problemas físicos con muchas escalas de longitud", por Kenneth Wilson; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1979], es posible calcular con exactitud los exponentes críticos en



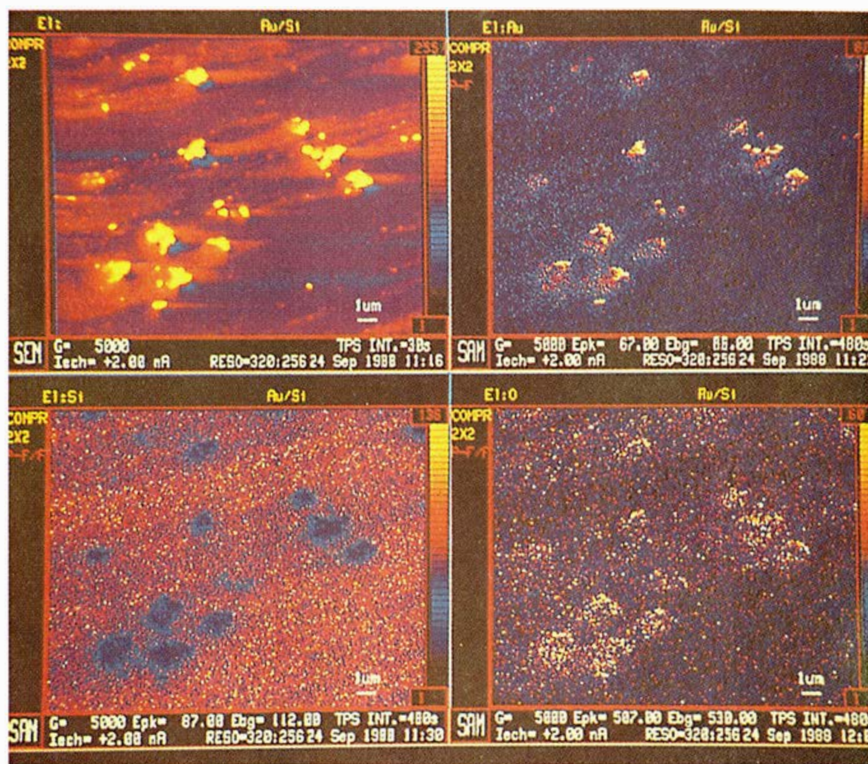
3. MODELO SIMPLIFICADO de una superficie cristalina. En ella pueden encontrarse distintos tipos de defectos: átomos que faltan (vacantes), escalones de altura atómica que flanquean las terrazas planas de tamaño irregular y pequeñas islas en las terrazas. Hay, además, átomos y moléculas de contaminantes que se encuentran adsorbidas en la superficie o que están incoporados a la misma.

transiciones de fase bidimensionales y comparar nuestros modelos teóricos con la realidad exterior. En los últimos años, la física en dos dimensiones nos ha deparado ya algunos descubrimientos inesperados; entre otros, la naturaleza especial de la fusión superficial o el efecto Hall cuántico, por el cual Klaus von Klitzing recibió el premio Nobel en 1985.

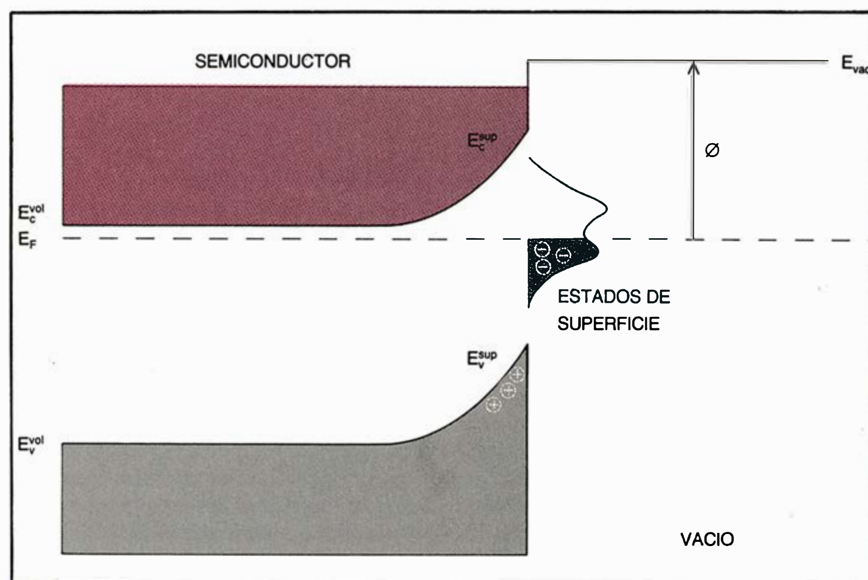
Si sólo fuera ésa la razón para estudiar superficies de sólidos, nuestra especialidad no habría pasado de ser una curiosidad académica. La razón fundamental del florecimiento de la física de superficies reside en su *utilidad práctica* en algunos campos tecnológicos de primerísima importancia económica como la microelectrónica, la catálisis, los tratamientos superficiales por implantación iónica o láser y la ingeniería atómica de materiales que permite la fabricación de materiales artificiales con propiedades ajustadas a nuestros deseos.

Para avanzar en nuestro conocimiento de estos complejos procesos, conviene comenzar con una superficie ideal y depositar sobre ella, de un modo controlado, las impurezas o átomos cuyo papel se desee determinar. Esto se consigue trabajando en condiciones de ultra alto vacío (UAV), donde la muestra pueda ser limpiada adecuadamente y mantenida en este estado el tiempo suficiente para realizar los experimentos planeados. Habitualmente, la presión necesaria es muy reducida, del orden de 10^{-13} atmósferas, equivalente a la presión en la superficie de la Luna, y se consigue bombeando con una variedad de dispositivos un recipiente de acero inoxidable con ventanas y puertas removibles. La limpieza de la muestra una vez en UAV se consigue por bombardeo iónico con un gas noble o por rotura en vacío.

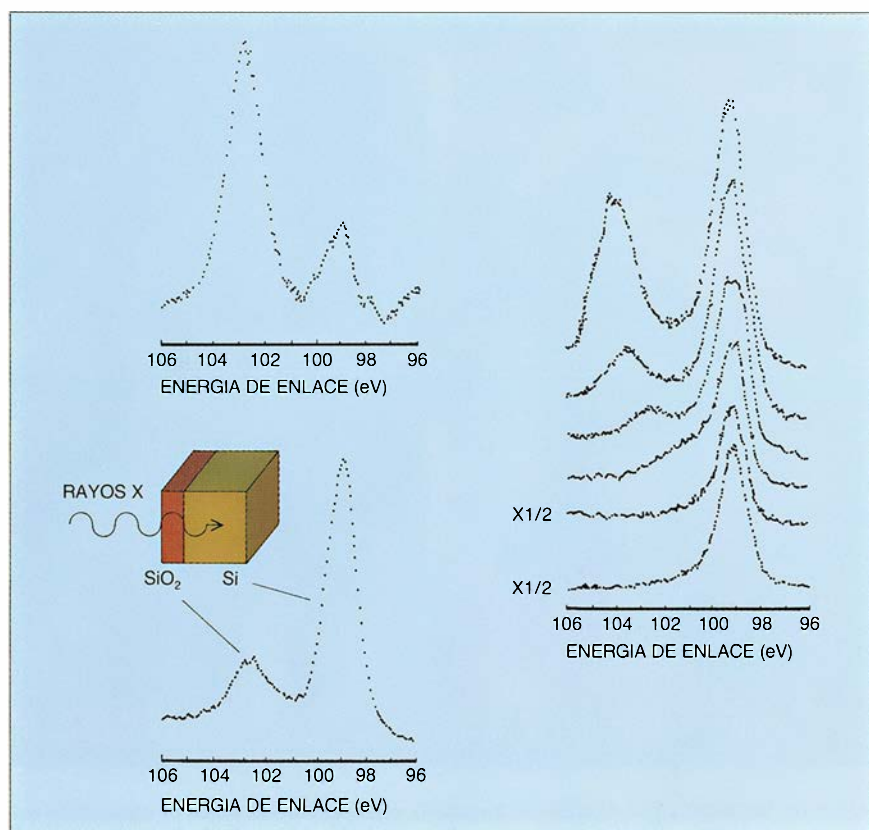
Detengámonos en las reconstrucciones superficiales. Lo mismo la posición geométrica de los átomos, que la distribución energética de los estados electrónicos en las proximidades de la superficie de un cristal, difieren, en general, de su posición y distribución en el interior del volumen. Débese ello a la rotura de la simetría y a la distinta coordinación de los átomos de la superficie con respecto a los del volumen. Si nos imaginamos un cristal metálico como un conjunto de bolas de acero unidas con muelles y cortamos éstos a lo largo de un plano para formar una superficie, no es difícil entender intuitivamente que los átomos de la superficie puedan moverse con respecto a las posiciones de equilibrio del volumen, ya que ahora no tienen vecinos hacia el



4. EN UN MICROSCOPIO AUGER DE BARRIDO se pueden obtener mapas de composición química de la superficie de una muestra con excelente resolución lateral. En la figura se muestra la superficie de una oblea monocristalina de silicio, de las empleadas usualmente en la industria microelectrónica, sobre la que se han evaporado partículas de oro. Se presentan imágenes de la distribución lateral de oro, oxígeno y silicio, así como la imagen conjunta. Los aglomerados de oro aparecen en la imagen superior derecha como islas brillantes. En la imagen inferior derecha se observa una acumulación de oxígeno en las proximidades de las islas de oro, probablemente como resultado de la acción catalítica de este metal sobre la oxidación del silicio. (Cortesía de RIBER.)



5. LA ENERGIA POTENCIAL DE UN ELECTRON en un semiconductor presenta un intervalo prohibido, donde no existen estados cuánticos permitidos para el electrón. En la figura se indican los bordes de la banda de valencia y de conducción de un semiconductor dopado con impurezas que introducen electrones (tipo *n*), así como el nivel de Fermi. La posición de éste en el volumen puede modificarse a voluntad cambiando el dopaje. La presencia de estados electrónicos de superficie en la zona prohibida de energía modifica la distribución de carga. La carga acumulada en estos estados se origina en la zona de vaciado que se extiende hacia el interior del cristal. Como resultado de esta transferencia de carga, las bandas electrónicas se curvan cerca de la superficie y el nivel de Fermi queda fijado en el centro de la región prohibida. Al variar el dopaje en el volumen, cambia la curvatura de las bandas pero no la posición del nivel de Fermi en la zona prohibida. La función de trabajo (distancia entre el nivel de Fermi y el de vacío) es independiente del dopaje volúmico.



6. ESPECTROS DE FOTOEMISIÓN con rayos X del nivel *2p* de silicio. El espectro de la parte inferior izquierda corresponde al óxido que crece espontáneamente al exponer un cristal de silicio a la atmósfera (óxido nativo). El de la parte superior izquierda, a un óxido térmico crecido por el procedimiento habitual en la industria. El pico a mayor energía de ligadura se origina en átomos de silicio ligados químicamente a oxígeno, mientras que el de la derecha refleja silicio unido a silicio. La distancia en energía entre ambos picos indica que la composición química del óxido es SiO_2. La altura relativa de ambos picos indica el espesor del óxido en cada caso. El panel de la izquierda muestra el proceso de crecimiento de un óxido de silicio mediante oxidación catalítica promovida por potasio. Los datos prueban que el óxido así preparado tiene una composición química idéntica al industrial. Los espectros han sido obtenidos por J. Alvarez, E. G. Michel y M. C. Asensio en el LASUAM.

exterior del cristal. Los cambios estructurales que ocurren en la región superficial pueden implicar a varias capas atómicas. Se dice que la superficie se ha reconstruido.

Este efecto se produce también en las superficies de los semiconductores, aunque por distintas razones. Al cortar un cristal de un semiconductor para formar una superficie, aparecen enlaces direccionales rotos, que representan una enorme energía. Para rebajarla, los átomos que se encuentran en la superficie se desplazan bastante de las posiciones equivalentes a las que ocuparían en el volumen. En el caso de la superficie (100) del silicio, los átomos se juntan de dos en dos formando dímeros, lo cual reduce a la mitad el número de enlaces insatisfechos. Los enlaces no satisfechos que quedan forman estados electrónicos de superficie dentro del intervalo prohibido de energías del semiconductor [*véase la figura 5*]. Estos estados de superficie acumulan carga eléctrica e influyen en el funcionamiento de los dispositivos electrónicos. Son, entre otras cosas, los responsables del fenómeno de fijación ("pinning") del nivel de Fermi, esto es, la independencia de la función de trabajo (mínima energía requerida para extraer un electrón del cristal) del silicio con respecto al nivel de dopado del volumen.

Las propiedades electrónicas de una superficie semiconductora pueden modificarse depositando átomos de otra especie química sobre ella. Así, al adsorber *media monocapa de un metal alcalino*, como potasio o cesio, sobre la cara (100) de silicio, se produce una drástica disminución de la función de trabajo. Este fenómeno es esencial para la construcción de detectores de radiación electromagnética en la región de los infrarrojos.

Los detectores ópticos han constituido un área de investigación privilegiada ya desde la época de Langmuir. Un detector eficiente de radiación infrarroja es el corazón de cualquier sistema de visión nocturna, de detección de tumores o de astronomía infrarroja. Puede fabricarse un detector semejante mediante un substrato semiconductor (silicio o arseniuro de galio) en el cual se ha hecho disminuir la función de trabajo por evaporación de óxidos de metales alcalinos sobre su superficie. La disminución debe ser tal que el nivel de energía del vacío en el exterior de la superficie se encuentre por debajo de la banda de conducción en el volumen. Esto es lo que se conoce como afinidad electrónica negativa (AEN). En estas condiciones, un fotón de energía mayor que el intervalo prohibido del semiconductor produce, al ser absorbido por el material, un par electrón-hueco. Los electrones pueden emitirse al exterior del dispositivo. De este modo, se transforma la radiación infrarroja en corriente eléctrica, que puede luego manipularse de manera conveniente hasta resultar en la imagen visible de la fuente de radiación [*véase la figura 8*].

En el curso de una investigación destinada a aclarar la estructura microscópica de estos fotocátodos, Eva Oellig y Enrique G. Michel, entonces estudiantes de doctorado del laboratorio de física de superficies de la Universidad Autónoma de Madrid (LASUAM), demostraron que los metales alcalinos actuaban como *catalizadores de la oxidación de semiconductores*, acelerando la cinética y haciendo disminuir la temperatura del proceso. Los átomos del catalizador podían, además, eliminarse por completo de la superficie mediante un breve calentamiento a temperatura moderada. Esto ha sugerido la posible aplicación práctica de este nuevo método para la producción de óxidos de puerta de espesor controlado en las próximas generaciones de dispositivos microelectrónicos. Para ello, es necesario comprobar la composición y microestructura de los óxidos de silicio así producidos y compararlos con los desarrollados por los métodos habituales en la industria.

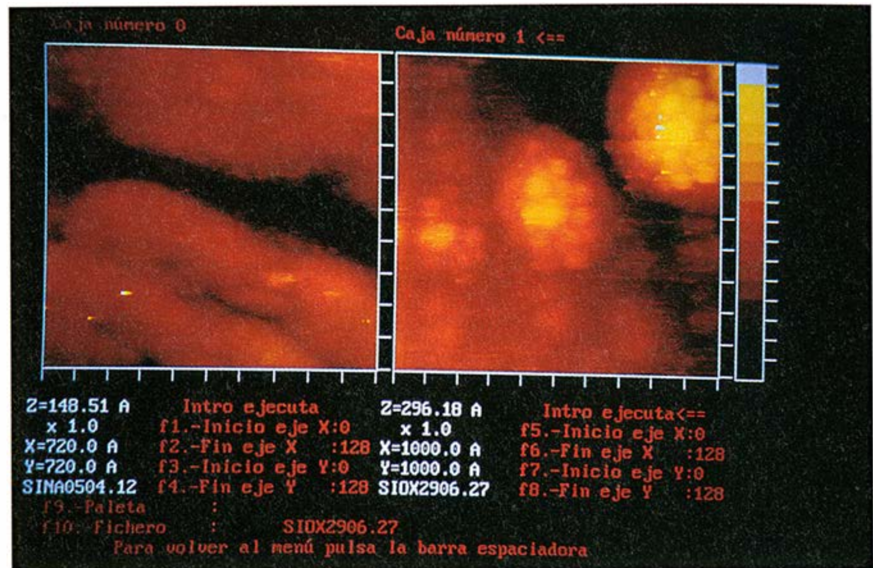
La composición química de estos óxidos, como la de cualquier muestra sólida, puede ser objeto de análisis por espectroscopía de fotoelectrones. En esta técnica, heredera directa del efecto fotoeléctrico, se envía un haz monocromático de rayos X (por ejemplo, la radiación Mg K_α con una energía de 1253,6 electronvolt) sobre la muestra, donde arranca electrones de los niveles electrónicos profundos. La energía cinética de los fotoelectrones es la diferencia entre la energía de los fotones y la energía de ligadura de los electrones en el sólido. Estas son

características del elemento químico al que pertenece el electrón y de su estado químico. Por tanto, midiendo la energía de los fotoelectrones emitidos al vacío se obtiene un espectro con picos a ciertas energías, cuyas alturas relativas reflejan la composición de la muestra analizada. En el caso que nos ocupa, el óxido de silicio producido por oxidación catalítica tiene una composición química (SiO_2) idéntica a la del óxido térmico preparado a alta temperatura en atmósfera de oxígeno.

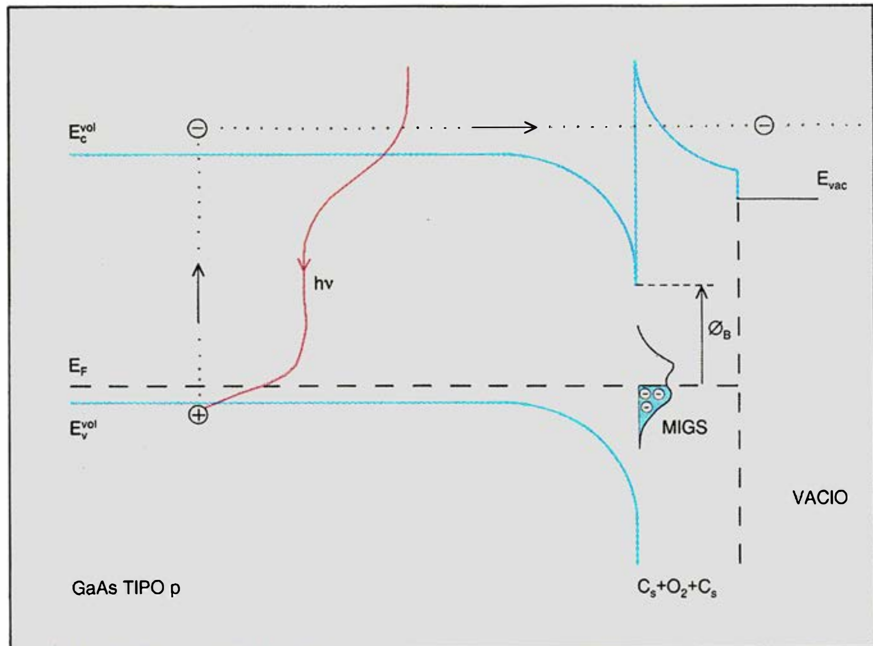
El microscopio de efecto túnel (STM), descubierto por Binnig y Rohrer (por lo que fueron galardonados con el premio Nobel en 1985), nos ofrece una visión sorprendente de la microestructura de los óxidos preparados por oxidación catalítica. La imagen de la figura 7, tomada por Amadeo L. Vázquez de Parga y Carmen Ocal, sugiere que el óxido de silicio catalítico ha crecido a través de una reacción química de estado sólido entre los óxidos del metal alcalino y el substrato de silicio. La reacción de transferencia del oxígeno entre el metal alcalino y el cristal semiconductor tiene un fuerte carácter local, que da lugar a la aparición de los aglomerados circulares visibles en la imagen del STM.

Como consecuencia inesperada del esfuerzo realizado para controlar la activación de fotocátodos, se han hecho recientemente avances muy importantes en nuestra comprensión del proceso de formación de la barrera Schottky en la interfase metal-semiconductor. Esta barrera energética es responsable de la actividad rectificadora de la unión metal-semiconductor descubierta por K. F. Braun hace más de un siglo. La explicación microscópica de la formación de la barrera Schottky se había convertido en una piedra de toque para la física de superficies. En efecto, las pruebas experimentales indicaban que una sola capa atómica de metal depositada sobre la superficie del semiconductor bastaba para producir la misma barrera Schottky encontrada en los diodos y dispositivos comerciales. Los investigadores habían concluido que, en la interfase, había unos estados electrónicos, localizados en el intervalo de energía, en el interior de la zona prohibida del semiconductor; éstos fijaban la posición energética del nivel de Fermi, determinando así la altura de la barrera.

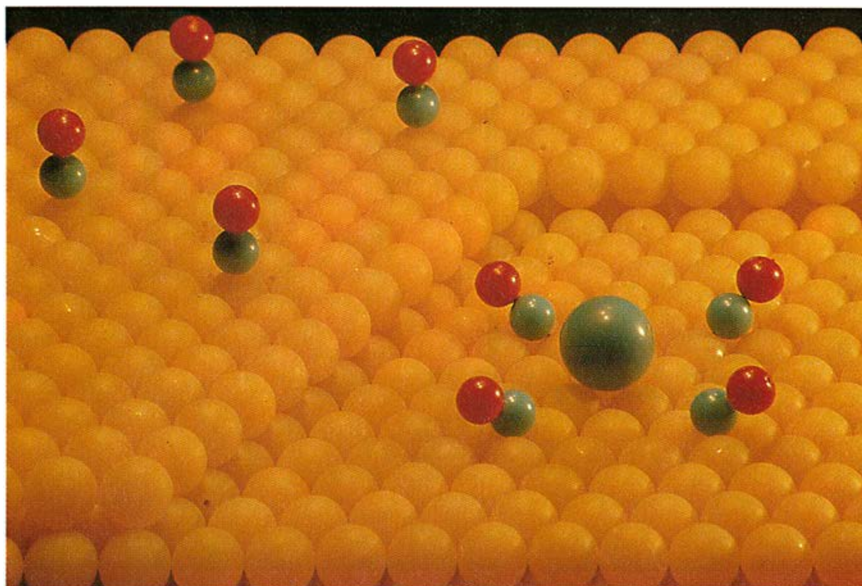
Ahora bien, ¿cuál era el origen de estos estados? Un largo contencioso se había estado desarrollando entre dos escuelas de pensamiento. Una de



7. EL MICROSCOPIO DE EFECTO TUNEL (STM) muestra sorprendentes diferencias entre dos óxidos crecidos sobre una oblea de silicio. Los óxidos tienen el mismo espesor promedio medido por espectroscopía Auger. Ambos no presentan, además, diferencia alguna con respecto a otros contaminantes. La imagen de la izquierda corresponde a un óxido nativo. El otro ha sido preparado mediante oxidación catalítica del silicio a través de un método desarrollado en el laboratorio del autor que consiste en evaporar potasio sobre el substrato, exponer a oxígeno y calentar brevemente el cristal de silicio dentro del sistema de vacío. En tanto que el óxido nativo reproduce, básicamente, la estructura de terrazas del substrato monocristalino, el óxido catalítico presenta un aspecto de núcleos redondeados de unos 50 angstrom de tamaño promedio, propio de una reacción química local.



8. ORIGEN DE LA BARRERA SCHOTTKY. Algunas superficies de semiconductores, como la cara (110) del AsGa, no tienen estados electrónicos de superficie en la zona prohibida. En este caso las bandas electrónicas son planas hasta la superficie. Al depositar una capa de cesio metálico sobre la superficie, la función de onda de los electrones deslocalizados del metal se extiende al interior de la zona prohibida del semiconductor. Así se inducen estados electrónicos denominados MIGS (siglas de "Metal Induced Gap States") que fijan el nivel de Fermi aproximadamente en el centro de la zona prohibida con independencia del tipo de dopaje volúmico. Las bandas del semiconductor quedan curvadas, dando origen a una barrera energética para el transporte de carga entre semiconductor y metal que se conoce como barrera Schottky, ϕ_B. Si depositamos un aislante que no tenga niveles electrónicos en ese rango de energías, por ejemplo, óxido de cesio, no aparecen estados en la región prohibida. El nivel de Fermi queda libre dentro del intervalo, "gap", y su posición depende ahora del tipo de dopaje. Una nueva evaporación de cesio sobre la muestra devuelve el carácter metálico a la interfase, fijando de nuevo el nivel de Fermi en el centro de la zona prohibida y curvando las bandas. La figura ilustra el principio de funcionamiento de un fotocátodo sensible al infrarrojo.



9. ORIENTACION de moléculas adsorbidas; puede ser determinada experimentalmente utilizando las reglas de selección que gobiernan el proceso de fotoemisión desde orbitales moleculares de simetría bien definida. Las moléculas de monóxido de carbono se adsorben perpendicularmente a la superficie en un metal limpio, con el átomo de carbono cerca de la superficie. Las moléculas adsorbidas se inclinan fuera de la normal en las proximidades de átomos de metales alcalinos (representados por la bola azul en la figura) como resultado de interacciones electrostáticas de corto alcance. Esta modificación parece ser un paso intermedio crucial en el proceso de rotura catalítica de la molécula.

ellas, representada por Bill Spicer, de la Universidad de Stanford, consideraba que los estados que fijaban la posición del nivel de Fermi estaban producidos por defectos introducidos en el substrato durante la deposición del metal. La otra escuela se originó en una idea de Volker Heine, de la Universidad de Cambridge, desarrollada y perfeccionada por Fernando Flores, de la UAM. Esta proponía que el simple hecho de tener un metal en contacto con un semiconductor inducía estados electrónicos en el intervalo de energía prohibido. El carácter metálico de la capa absorbida sería, por tanto, determinante.

Un elegante experimento diseñado y realizado por José Enrique Ortega, del LASUAM, en colaboración con Clemens Laubschat, Mario Priestch y Gunter Kaindl, del centro de radiación de sincrotrón BESSY en Berlín, ha arrojado luz sobre la cuestión debatida. Para evitar la formación de defectos, era preciso asegurarse de que la adsorción del metal no dañaba la red del semiconductor; para comprobar el papel de la metalicidad, se requería una capa depositada cuyo carácter metálico pudiera encenderse y apagarse a voluntad. La primera condición se conseguía evaporando cesio a baja temperatura sobre arseniuro de galio; la segunda, adsorbiendo oxígeno sobre la capa metálica, lo que producía óxidos de cesio de carácter aislante. Los resultados experimentales demostraron que, si bien la presencia de defectos en suficiente densidad podía fijar el nivel de Fermi, éstos no eran necesarios en absoluto para explicar lo que ocurría. El carácter metálico de la capa depositada sobre la superficie semiconductora perfecta era, de hecho, la condición básica requerida.

La mayoría de los semiconductores usados en la tecnología moderna son, de hecho, monocristales, razón por la cual la aplicación directa de los descubrimientos de la física básica de superficies resulta casi inmediata. En cambio, la mayoría de los metales de uso cotidiano, desde un tenedor hasta las pistas de metalización de un circuito integrado, son policristales: sus superficies están constituidas, pues, por una variedad de planos cristalinos. A pesar de ello, los investigadores han conseguido desarrollar ("crecer" en el argot) en los laboratorios monocristales metálicos y cortarlos adecuadamente para exponer una sola cara cristalina. La información obtenida de este modo es crucial para comprender el funcionamiento de las superficies reales, incluso en propiedades tan complejas como la actividad catalítica.

Los *catalizadores* de reacciones heterogéneas están compuestos por pequeños aglomerados metálicos dispersados, para aumentar su superficie, sobre substratos de alúmina o zeolita. En la práctica, los catalizadores son "promovidos" por aditivos que contienen metales alcalinos, especialmente potasio, con el fin de mejorar la selectividad o la reactividad del catalizador. Entre los ejemplos bien conocidos de reacciones así catalizadas citaremos la síntesis Fischer-Tropsch de hidrocarburos a partir de mezclas de CO y H_2, o la eliminación del CO y NO de los gases de los tubos de escape de los automóviles. El papel exacto de los promotores alcalinos ha sido muy debatido en los últimos años. Las técnicas de la física de superficies han hecho algunas importantes aportaciones a nuestra comprensión de los procesos catalíticos.

En un trabajo del autor en colaboración con el grupo de Gerhard Ertl, entonces en la Universidad de Munich, se ha desarrollado un método para determinar la orientación de moléculas quimisorbidas sobre substratos metálicos. Para ello es necesario emplear las propiedades únicas de la *radiación de sincrotrón* [véase "La radiación de sincrotrón" por Herman Winick; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1988]; en particular, el hecho de que esta radiación se halle totalmente polarizada en el plano de la órbita de los electrones. Al enviar fotones de una energía dada sobre la muestra, se extraen electrones de cada uno de los orbitales moleculares accesibles. Estos fotoelectrones son colectados por un analizador bidimensional que mide cuántos electrones de cierta energía cinética se emiten en cada dirección del espacio.

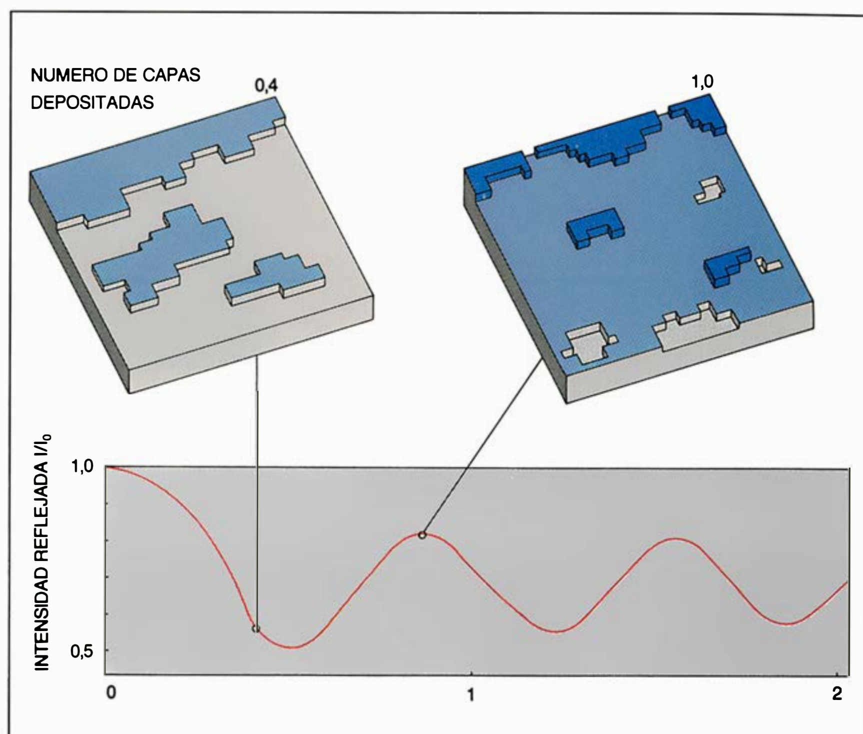
Las reglas cuánticas de selección obligan a que el estado inicial y final del proceso de fotoemisión tengan una simetría adecuada. Supongamos una molécula con un eje de simetría (como el monóxido de carbono, CO), adsorbida perpendicularmente a la superficie. En ese caso, no se emitirían fotoelectrones, desde los orbitales moleculares, a lo largo de las direcciones espaciales correspondientes al plano perpendicular al vector campo eléctrico de la radiación incidente. Así se ha determinado que el monóxido de carbono se adsorbe con su eje C-O perpendicular a la superficie de un cristal de paladio limpio. Al depositar potasio sobre la superficie del paladio, las moléculas de CO adsorbidas en las proximidades de los átomos del promotor se encuentran notablemente inclinadas con su eje formando un ángulo de más de 20 grados con respecto a la normal a la superficie. Estos resultados indican que el papel de los promotores podría ser el de inclinar el eje interatómico de las moléculas adsorbidas, lo cual alarga su distancia internuclear, debilita su enlace y facilita su disociación.

Como hemos mencionado antes,

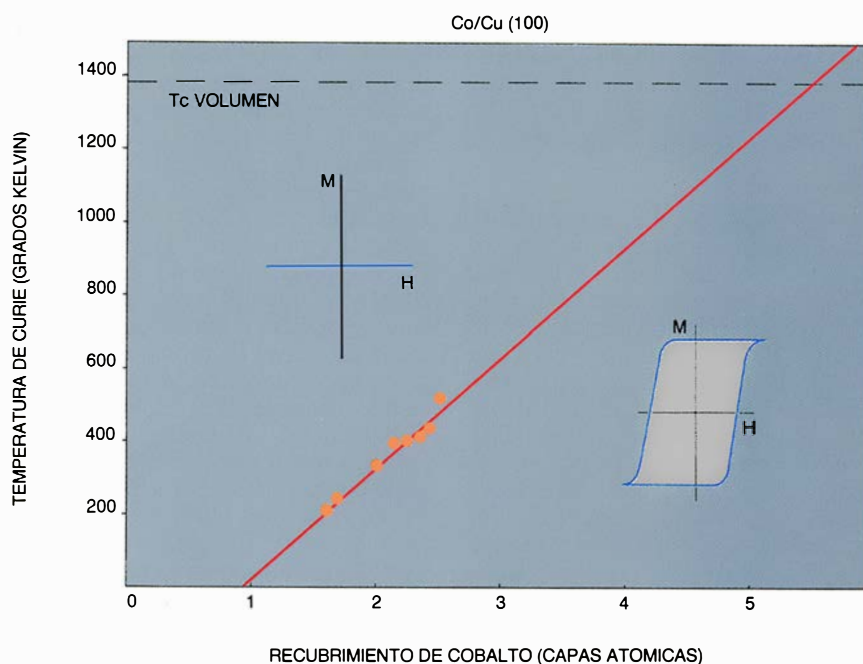
cabe esperar que las propiedades *colectivas* (superconductividad, magnetismo) de la superficie difieran bastante de las mismas en el volumen.

Unas de las magnitudes que define las *propiedades magnéticas* de un sólido es la temperatura de Curie, T_c. Por encima de ella, el material deja de comportarse como un imán, esto es, la magnetización se hace cero. La temperatura de Curie puede medirse experimentalmente determinando a qué temperatura desaparece el ciclo de histéresis característico de un material ferromagnético. Es posible explorar el efecto de la dimensionalidad en el comportamiento magnético estudiando las propiedades, por ejemplo la temperatura de Curie, de capas muy delgadas de material ferromagnético en función de su espesor. Para ello es preciso seleccionar los materiales adecuados y prepararlos apropiadamente. Recientemente, siguiendo una sugerencia de Félix Ynduráin, de la UAM, que ha calculado que la interacción electrónica entre cobalto y cobre es extremadamente pequeña, se ha realizado este experimento desarrollando epitaxialmente películas de un material magnético (cobalto) sobre un substrato monocristalino de un material no magnético (cobre).

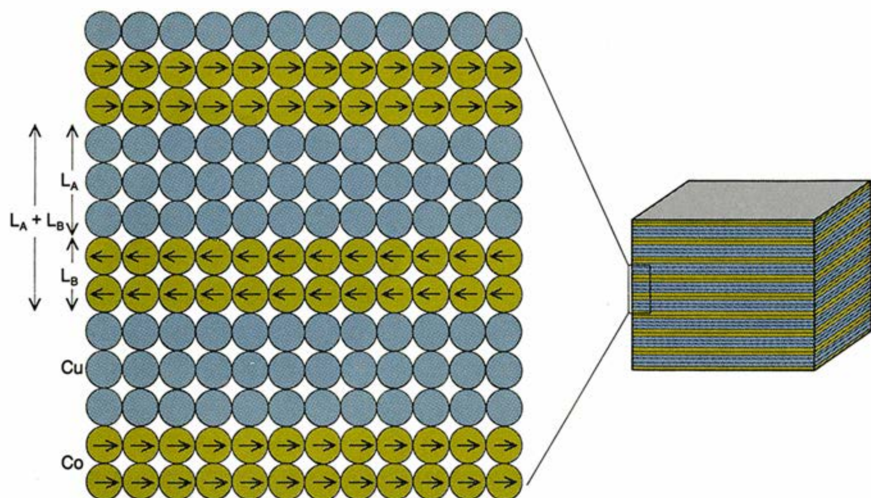
El número de capas atómicas depositadas sobre el substrato se puede determinar con precisión exquisita, midiendo la intensidad reflejada de un haz de átomos de helio que se hace incidir sobre la superficie del cristal, mientras éste está creciendo. La técnica se muestra extraordinariamente sensible al orden superficial, ya que los átomos de helio, al ser neutros, no pueden penetrar dentro de la superficie y rebotan como bolas de billar sobre ella. La intensidad reflejada oscila durante la evaporación, siendo máxima cuando se completa una capa atómica y mínima justo cuando se ha depositado media monocapa. Basta, pues, contar las oscilaciones para saber el número de capas de átomos que se han depositado. Cuando el cristal del substrato se ha preparado de una manera cuidadosa, es posible desarrollar capas bidimensionales de alta perfección estructural. Así, Juan José de Miguel, del LASUAM, en un trabajo conjunto con el grupo de J. Kirschner, de la Universidad Libre de Berlín, ha determinado la temperatura de Curie de capas ultradelgadas de cobalto de espesor variable crecidas epitaxialmente sobre cobre. Han obtenido unos resultados sorprendentes. La temperatura de Curie de películas delgadas es mucho menor que la del material masivo y, además, va-



10. OSCILACIONES DE LA INTENSIDAD DEL HAZ ESPECULAR de átomos de helio reflejado por la superficie de un cristal de cobre durante su crecimiento a partir de un vapor de átomos de cobre. El crecimiento del cristal se lleva a cabo por evaporación térmica de cobre sobre el substrato mediante epitaxia de haces moleculares. Las oscilaciones reflejan la perfección estructural del cristal durante el proceso de crecimiento epitaxial. Cuanto mayor es el orden, mayor es la intensidad reflejada por la superficie. Dependiendo de la temperatura del substrato, el cristal crece por propagación de sus escalones naturales (en cuyo caso la intensidad reflejada no oscila) o por nucleación de islas bidimensionales sobre las terrazas. Este modo de crecimiento, propuesto por Cabrera y Burton en 1949, ha sido confirmado por los datos de dispersión de átomos de helio y por simulaciones de Monte Carlo realizadas por Julio Ferrón y José M. Gallego, del laboratorio de superficies de la UAM.



11. LA TEMPERATURA DE CURIE, T_c, de películas delgadas epitaxiales de cobalto crecidas sobre un substrato monocristalino de cobre depende muy fuertemente del espesor de la capa de cobalto. Como muestra la figura, el valor experimental de T_c se ha determinado comprobando a qué temperatura desaparece el ciclo de histéresis característico de un material ferromagnético. Nótese que la extrapolación de los datos indica que tan sólo son necesarias entre cinco y seis capas atómicas para que la película de cobalto se comporte como el volumen. Por otro lado, la extrapolación sugiere que una sola capa atómica de cobalto podría no presentar orden magnético a ninguna temperatura finita.



12. SUPERRED METALICA compuesta por dos metales distintos, *A* y *B*, crecidos alternadamente con una periodicidad L_A y L_B, respectivamente. La periodicidad cristalina de la superred es $L_A + L_B$. Para obtener una superred cristalina es preciso elegir los metales *A* y *B* de modo que sus constantes de red no sean muy distintas y evaporarlos en condiciones controladas de ultra alto vacío. En superredes de cobalto y cobre crecidas epitaxialmente se observa que, en ausencia de campo magnético externo, el vector magnetización de las capas de cobalto (*flechas*) se alinea antiparalelamente en capas próximas. La superred en su conjunto tiene un orden antiferromagnético y una magnetización nula. Bajo un campo magnético suficientemente elevado, los vectores magnetización de todas las capas de cobalto apuntan en la misma dirección. Para campos intermedios, la magnetización de cada capa de cobalto gira en el plano un cierto ángulo para minimizar su energía, de manera que, a determinados campos magnéticos, aparecen complejos ordenamientos tridimensionales del vector magnetización que sugieren la posibilidad de almacenar información magnética en tres dimensiones.

ría notablemente con el espesor evaporado. Se necesitan de cinco a seis capas de átomos para alcanzar la temperatura de Curie del volumen. Más sorprendente aún es el hecho de que una extrapolación lineal de los datos experimentales sugiera que la temperatura de Curie de una sola capa atómica de cobalto sea de cero grados Kelvin; esto es, una capa estrictamente bidimensional no presentaría orden magnético a ninguna temperatura finita.

Estos resultados nos han permitido explorar un terreno de gran interés práctico. En efecto, la industria que utiliza el almacenamiento magnético de información demanda el desarrollo de soportes materiales que puedan contener cada vez mayor cantidad de información. En particular, sería muy conveniente poder almacenar información magnética en tres dimensiones. Para ello deberíamos disponer de nuevos materiales con alta anisotropía estructural y magnética [véase "Materiales electrónicos y magnéticos" por Prahaven Chaudhari, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1986]. Una estrategia extendida en la actualidad consiste en desarrollar, en condiciones de ultra alto vacío, cristales sintéticos de periodicidad artificial: las superredes. Una *superred metálica* está formada por capas delgadas alternadas de dos metales *A* y *B*, de distintas propiedades. En el caso que nos ocupa, *A* sería un material magnético y *B* un metal no magnético. Los átomos de ambos metales se evaporan cuidadosamente sobre un soporte elegido, para que el crecimiento de ambos sea epitaxial y sus periodicidades verticales bien definidas. De este modo, se consigue desarrollar cristales con las periodicidades deseadas de fases que no existen en la naturaleza o que son metaestables. La exploración de las propiedades magnéticas de estos nuevos materiales no ha hecho más que comenzar, y ya nos ha suministrado varias sorpresas, indicio de que algo excitante se esconde en la naturaleza cuando nuestro control sobre ella alcanza este nivel de refinamiento.

En un esfuerzo reciente del laboratorio de superficies de la UAM, A. Cebollada y J. M. Gallego han desarrollado multicapas cristalinas de cobalto/cobre por evaporación alternada sobre la cara (100) de monocristales de cobre. El espesor de cobalto repetido periódicamente ha superado siempre la cifra de seis capas atómicas, de suerte que cada unidad estructural de la superred alcanzase las propiedades magnéticas del volumen. El número de capas evaporadas y su perfección estructural se han determinado mediante la técnica de oscilaciones en la intensidad reflejada de haces de helio descrita más arriba. Las propiedades magnéticas de estas superredes metálicas, estudiadas en colaboración con J. L. Martínez mediante difracción de neutrones en el Instituto Laue-Langevin, han resultado ser inesperadas. En ausencia de un campo magnético exterior, la superred se comporta como un material antiferromagnético, esto es, el vector magnetización de las capas de cobalto, que se encuentra siempre en el plano de éstas, está ordenado antiparalelamente en capas consecutivas [*véase la figura 12*]. En estas condiciones, la superred en su conjunto no presenta magnetización alguna.

Al aplicar un campo magnético exterior de intensidad elevada en la dirección paralela al plano de las capas, éstas se ordenan magnéticamente en la dirección del campo externo y la superred se convierte en ferromagnética. Sin embargo, lo más interesante ocurre cuando el campo externo se aumenta de una manera suave. Para ciertos valores bien definidos de éste, la magnetización de la superred parece crecer de una manera discreta. Esto sugiere que, aplicando un campo magnético exterior de esta magnitud, es posible crear complejos patrones de magnetización en la superred. La aplicación práctica de estos descubrimientos para el almacenamiento de información no está aún a la vista, pero es indiscutible que nuestra capacidad de explorar la física de sistemas de baja dimensionalidad está abriendo por primera vez un mundo fascinante a nuestros ojos.

Los ejemplos reseñados en este artículo describen parte del esfuerzo realizado en los últimos años en el laboratorio de superficies de la UAM. Aunque no cubren toda la riqueza de la física de superficies e interfases, sí pueden considerarse representativos de la fase explosiva de crecimiento que ésta atraviesa desde hace unos años en todo el mundo. Benevolentemente, podría calificarse la situación actual de esta disciplina como de adolescencia. Los próximos años conducirán, con toda probabilidad, a una etapa de madurez en la que la comprensión y el control de la naturaleza, en su nivel atómico, que estamos alcanzando, fructificará en nuevos y espectaculares desarrollos básicos y aplicados.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LOW ENERGY ELECTRONS AND SURFACE CHEMISTRY, de G. Ertl y J. Küppers. Chemie Verlag, 1987.

PHYSICS AT SURFACES, de Andrew Zangwill. Cambridge Unversity Press, 1988.

Taller y laboratorio

Versión doméstica del motor Stirling construido con materiales comunes

Jearl Walker

Los motores térmicos, que transforman el calor en trabajo mecánico utilizable, se dividen en dos grandes categorías: aquellos en que la combustión actúa directamente sobre un pistón y aquellos en que actúa indirectamente valiéndose de un intermediario conocido por fluido motor. Los primeros forman los motores de combustión interna, de los que el motor de gasolina constituye el ejemplo más conocido; cuando se quema el combustible, los productos gaseosos de la combustión se expanden directamente empujando un pistón. Los segundos pertenecen al grupo de los motores de combustión externa. De entre ellos, citemos la máquina de vapor, cuyo fluido motor es agua.

Otro caso de motor de combustión externa lo tenemos en el presentado en Escocia, en 1816, por el reverendo Robert Stirling. Originalmente era aire su fluido motor, pero en posteriores versiones se sustituyó por hidrógeno o helio. El motor Stirling merece nuestro interés por varias razones. Recicla continuamente su fluido motor; puede servir cualquier fuente calorífica, lo que permite elegir un combustible poco contaminante; además, al menos sobre el papel, debe ofrecer un rendimiento elevado en la conversión del calor en trabajo. Pese a todo, debido a un cúmulo de circunstancias, la idea de Stirling quedó arrumbada, primero por culpa del vapor y, luego, por la combustión interna.

Sin embargo, la idea ha saltado recientemente a la palestra, merced, en parte, a su escasa contaminación y, en parte, a que no necesita de un combustible derivado del petróleo. Ese motor ha captado la atención de alguno de nuestros asiduos de "Taller y laboratorio". Entre ellos, Peter L. Tailer, del Museo Windfarm, en Martha's Vineyard (Massachusetts), quien ha construido uno tomando como modelo el desarrollado en 1876 por A. K. Rider, de Philadelphia. Habida cuenta de su potencia útil, no es probable que el artefacto de Tailer ponga en apuros a los motores clásicos. Pero es fácil de construir con materiales corrientes y va a permitirnos estudiar el proceso termodinámico que lleva asociado.

Característica muy atractiva de esta máquina es que no necesita ni cilindros ni pistones finamente torneados, como les ocurre a otros motores Stirling y a todos los de combustión interna. Tal como se muestra en la figura 1, nuestro motor emplea dos latas (de soda o refresco) parcialmente sumergidas en agua. Esta se almacena en dos depósitos situados en la base. Cada lata está unida al extremo de una biela; el extremo se conecta al vástago de un volante con contrapeso montado en la parte superior de la máquina. Entre ambos depósitos discurre un tubo lleno de aire y asciende por las latas colocadas en ellos.

El foco calorífico que se emplea –que bien puede ser una llama– calienta una de los depósitos de agua; entonces, el aire encerrado en el tubo de interconexión va y viene de uno a otro depósito, las latas suben y bajan y el volante se pone a girar a unas decenas de revoluciones por minuto. Estos movimientos dependen de dos sutiles propiedades del artefacto: la disposición de las manivelas del volante, cuyos brazos externos son perpendiculares entre sí (vistos de costado), y el modo en que se transmite el calor desde el foco al aire encerrado en una de las latas.

Antes de entrar en los detalles de la máquina de Tailer, abordaremos los fundamentos del motor Stirling basándonos en el modelo que se ofrece en los textos y que se ilustra en la figura 2. Dos pistones macizos se ajustan con muy poco huelgo dentro de un cilindro y pueden ser impulsados hacia la izquierda o hacia la derecha, bien por la presión del aire, bien por el órgano mecánico al que estén unidos. En el centro del cilindro hay un material poroso, tal como una esponja metálica, que es el llamado regenerador y cuya misión consiste en almacenar temporalmente el calor cuando el motor está en marcha. Cerca de los pistones hay dos "acumuladores térmicos" cuyas temperaturas se mantienen constantes. A la izquierda se encuentra el "acumulador de calor", que se calienta merced a un foco calorífico. A la derecha tenemos el "acumulador de frío", cuya temperatura se mantiene baja gracias a un proceso de evacuación del calor.

Durante el funcionamiento del motor, el aire interno sufre cambios cíclicos de presión, temperatura y volumen; se dice que cambia de estado. En la ilustración se muestra la disposición de los pistones para cuatro estados. Las variaciones correspondientes del estado del aire se comprenderán mejor siguiendo la gráfica de la presión en función del volumen, que se representa en la figura 3. En el curso de su funcionamiento, el motor realiza ciclos siguiendo, en sentido horario, el contorno de una suerte de rectángulo deformado y sesgado que se representa en la figura.

Empecemos por el estado 1, que corresponde al primer dibujo de la serie y a la esquina superior izquierda del rectángulo sesgado. El pistón *B*, a la derecha, se encuentra junto al regenerador; algo más lejos está, a la izquierda, el pistón *A*. El aire encerrado entre los pistones se halla a alta presión. Conforme el acumulador de calor caldea el aire, éste se expande, desplazando *A* hacia la izquierda; el consiguiente aumento del volumen del espacio entre los pistones relaja la presión. Durante la expansión, la temperatura del aire se mantiene constante, dada la cercanía del acumulador de calor; por ello se dice que la expansión es isotérmica. Esta expansión viene representada por la curva superior del rectángulo sesgado. Cuando *A* llega al extremo izquierdo de su carrera, el aire se encuentra en el estado 2.

Seguidamente ambos pistones son desplazados hacia la derecha, no por

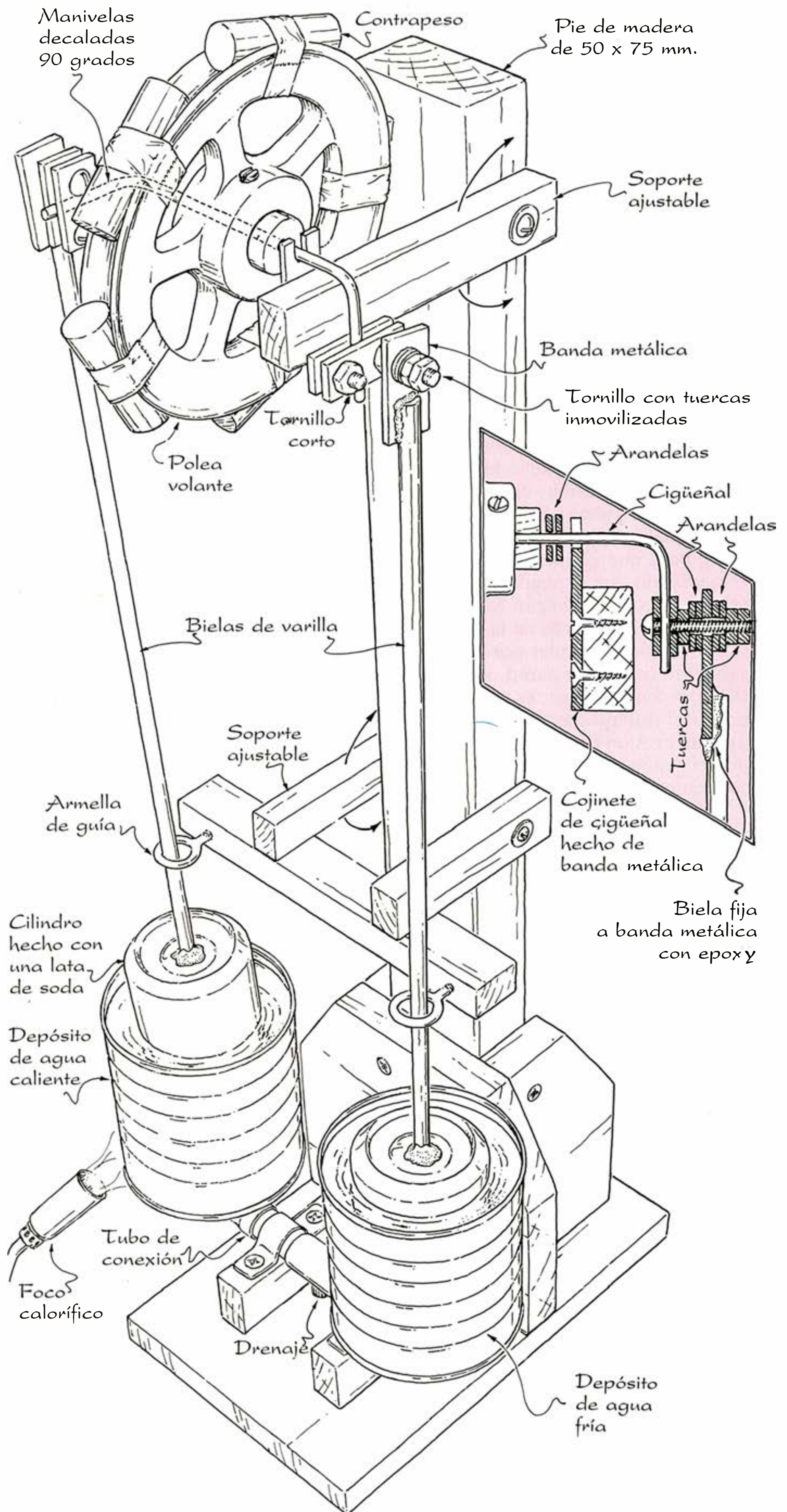
el calor, sino por el aparato mecánico al que están unidos, hasta que *A* llega al regenerador y *B* se encuentra en el extremo de la derecha. Este movimiento de los pistones promueve el flujo del aire a través del regenerador, que absorbe parte del calor y enfría el aire. El movimiento acompasado de los pistones impide que, durante esta transición, varíe el volumen del aire; por eso se habla de transición a volumen constante.

A continuación, los mecanismos de *B* obliga al pistón a desplazarse hacia la izquierda. En la medida en que el aire se comprime, va cediendo calor al acumulador de frío. Como éste se halla a temperatura constante, la del aire no varía; esta transición se denomina compresión isotérmica. Cuando termina el proceso, el aire se encuentra en el estado 4. Para finalizar el ciclo, el órgano mueve ambos pistones a la vez hacia la izquierda, hasta que quedan de nuevo en la posición del estado 1. La transición vuelve a desarrollarse a volumen constante. Cuando el aire fluye a través del regenerador, recupera el calor que había perdido en la anterior transición a volumen constante.

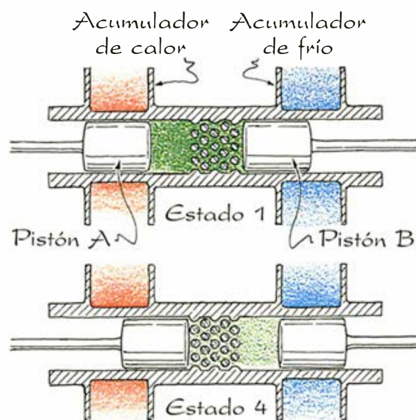
Así, pues, en su funcionamiento el motor itera el ciclo representado en la gráfica. En el paso del estado 1 al 2, uno de los pistones se mueve impulsado por la expansión del aire. En las otras tres transiciones, los pistones son accionados por la mecánica del aparato. ¿Es eficaz el motor? Dicho de otro modo: ¿es mayor el trabajo que realiza el aire sobre el órgano mecánico que el que realiza el órgano mecánico sobre el aire?

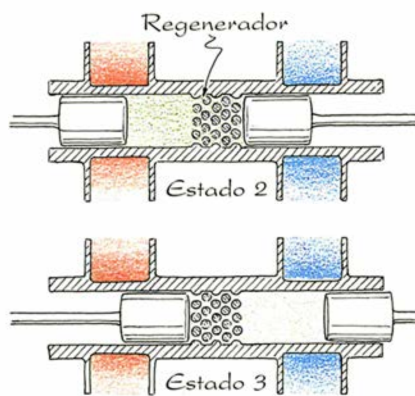
Para responder a esta pregunta, debemos primero precisar qué se entiende por "trabajo". Aunque vulgarmente el término pueda emplearse para designar consumo de energía, el concepto científico de trabajo es mucho más preciso: trabajo es la energía que debe transmitirse para mover algo. Según esta definición, más restrictiva, si, cuando se aplica una fuerza a un objeto, éste no se mueve, no se realiza trabajo. Si el objeto se mueve, el valor del trabajo será el producto de la fuerza por el desplazamiento del objeto. El agente que produce la fuerza, cualquiera que sea, pierde energía y ésta se manifiesta en forma de movimiento.

Imaginemos un recipiente cerrado con aire dentro y que ambos se hallen a la misma temperatura. Las moléculas de aire golpean sin cesar contra las paredes del recipiente y esos choques continuos constituyen una fuerza neta sobre cada pared, que no es

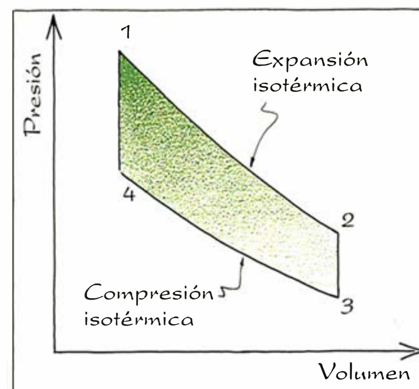


1. Motor Stirling, de Peter Tailer.





2. *Las cuatro etapas del motor Stirling, teórico.*



3. *Ciclo presión-volumen.*

sino la presión del aire sobre esa pared. Si ésta no se mueve hacia fuera a causa de la presión, el aire no realiza ningún trabajo sobre la pared. Pero si ésta cede, realiza trabajo. Así, pues, para que el aire realice trabajo es necesario que expanda el recipiente que lo confina. Según lo dicho, el trabajo es el producto de la fuerza de cada colisión molecular por el desplazamiento que en la pared origina esa colisión. Sin embargo, es más fácil expresar el trabajo mediante el producto de la presión (análoga de la fuerza) por el volumen (análogo del desplazamiento).

Si hubiera una fuerza exterior que redujera el volumen del recipiente, el trabajo lo haría esa fuerza y no el aire. El agente responsable de la fuerza (que podría ser una persona, o cualquier dispositivo mecánico) perdería entonces energía, que pasaría primero al recipiente y luego a las moléculas del aire, al moverse la pared hacia dentro. En este caso, se realiza trabajo contra el aire. El valor del trabajo es, también en este caso, el producto de la presión por el cambio de volumen.

La idea básica que subyace en el motor Stirling de aire consiste en lograr que ese aire efectúe trabajo sobre un pistón, impulsándolo hacia fuera y aumentando el volumen del espacio comprendido entre los dos pistones. El movimiento del pistón podrá, entonces, transmitirse a un artefacto que haga uso de la energía adquirida. Desde luego, si sólo se obtuviera una de tales expansiones, de poco serviría el motor. Este, por ello, debe comprimir periódicamente el aire para que pueda a su vez expandirse periódicamente y seguir realizando trabajo. En pocas palabras, el volumen del aire debe realizar ciclos. Ahora bien, recordemos que, para que el aire se comprima, el órgano mecánico debe realizar trabajo sobre aquél. Si el órgano realiza, en cada ciclo, un trabajo sobre el aire igual al que éste realiza sobre el aparato, el motor no produce trabajo neto y no sirve.

Esta dificultad se desvanece si interviene la temperatura del aire. Supongamos que el aire esté caliente siempre que realice trabajo. En ese caso, los choques de las moléculas de aire con el pistón serán violentos y la presión será alta. Como el trabajo efectuado sobre el pistón depende directamente de la presión, el trabajo será grande. Supongamos a continuación que la temperatura sea baja siempre que sea el ingenio quien realice trabajo sobre el aire. Entonces, los choques serán menos fuertes y, menor, el trabajo realizado sobre el aire. Si es posible ajustar la temperatura de este modo, el aire efectuará más trabajo sobre el órgano que éste sobre el aire.

En esta variación periódica de la presión y la temperatura se fundamenta el motor Stirling teórico (al igual que otros muchos motores). Durante la expansión isotérmica, cuando la temperatura del aire es alta, el aire realiza trabajo sobre el pistón A. Durante la compresión isotérmica, a baja temperatura, la maquinaria del aparato realiza trabajo sobre el aire. El motor rinde así un trabajo neto.

El trabajo que se pone en juego durante un ciclo del motor puede deducirse de la gráfica presión-volumen. Durante la expansión isotérmica, el trabajo realizado por el aire está representado por el área situada bajo la curva correspondiente. El área queda definida por la misma curva, el eje de volúmenes y dos rectas verticales, que van desde el eje hasta los puntos extremos de la curva. Durante la compresión isotérmica, el trabajo ejercido sobre el aire es el área situada bajo la curva correspondiente. Durante las transiciones a volumen constante, no se efectúa trabajo alguno al no haber cambio de volumen; así, el área que queda por debajo de esas rectas es nula. Para hallar el trabajo neto en un ciclo completo, hay que restar, del área definida por la curva de expansión, el área definida por la curva de compresión. El resultado es el área encerrada por el rectángulo sesgado.

Volvamos ahora al artefacto de Tailer. El depósito caldeado es el acumulador de calor. El otro depósito es el acumulador de frío, cuya temperatura se mantiene por radiación y convección térmicas. Los espacios llenos de aire, incluido el tubo que conecta los depósitos, hacen de cilindro. El tubo mismo, o una esponja metálica que pueda introducirse en aquél, funciona como regenerador. El órgano mecánico al que están unidas las latas es el volante.

Los dibujos de la figura 4 muestran la respuesta del aire confinado en la parte inferior del ingenio al calentamiento y movimiento del volante. Se representan el nivel de las latas y el agua, la dirección del flujo del aire y las orientaciones de las manivelas para ocho etapas. Los rótulos de las manivelas indican si están conectadas al depósito caliente o al frío.

El motor de Tailer es similar al teórico, pero carece de transiciones auténticamente isotérmicas o a volumen constante. Aun así, si representáramos gráficamente la presión del aire en función de su temperatura, el motor describiría ciclos más o menos como los reseñados para el motor teórico. Para seguir el ciclo, consideremos el motor cuando pasa por la etapa a, nada más salir de la etapa h. Durante a, la subida de la lata caliente es más rápida que el hundimiento de la fría. Después, las dos suben hasta lle-

gar a *c*. A partir de ahí, la lata fría se eleva más rápidamente de lo que se hunde la caliente, hasta que llegan a *d*. Adviértase que, durante la transición de *h* a *d*, la lata caliente contiene más aire que la fría. Significa esto que hay más aire calentándose que enfriándose, por lo que la presión del aire aumenta. Adviértase también que, durante el paso de *h* a *d*, aumenta el volumen del aire. Esta expansión la causa la presión adicional, lo que significa que el aire efectúa trabajo sobre las latas y, por tanto, también sobre el volante.

Cuando el motor evoluciona entre *d* y *h*, las variaciones de volumen y presión son exactamente las opuestas; el volante realiza trabajo sobre el aire. El movimiento neto de las latas comprime el aire; el desplazamiento del aire a la lata fría disminuye el calentamiento global del aire y reduce su presión. Durante la compresión, la presión es baja y, por ello, el trabajo que realiza el volante sobre el aire es menor que el trabajo que realizó el aire sobre el volante durante la transición de *h* a *d*. Gracias a ello, el aire realiza un trabajo neto.

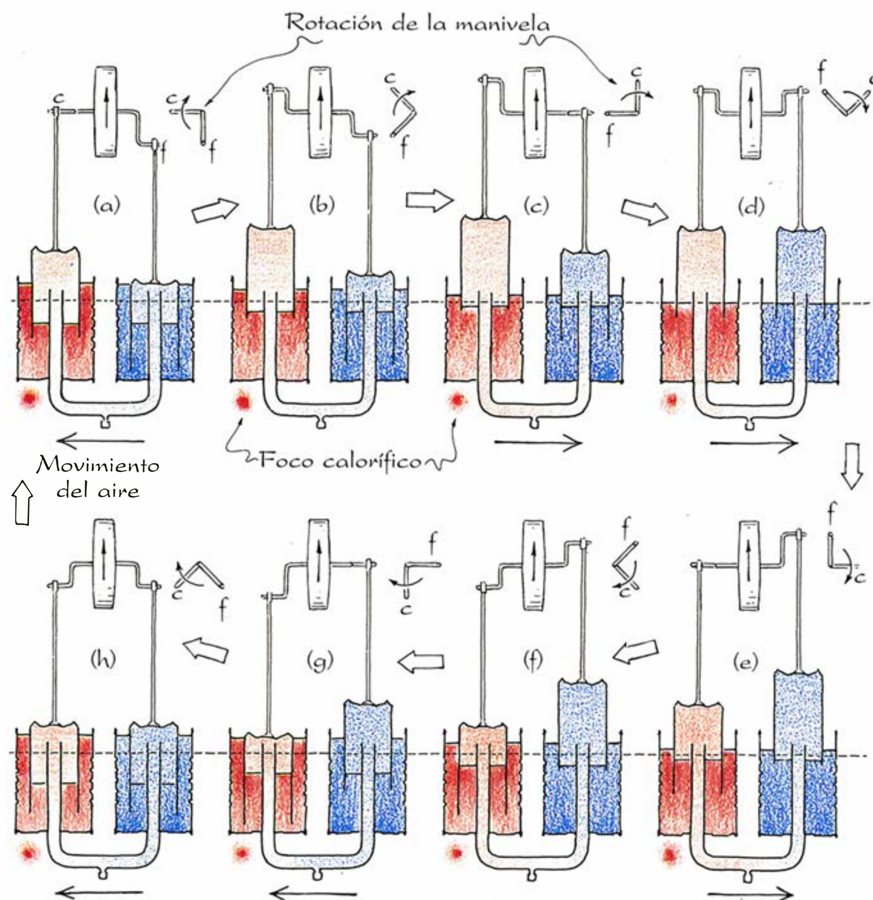
Tailer me ha remitido instrucciones y planos detallados para construir un motor, aunque señala que los pormenores pueden alterarse a voluntad en función de los materiales disponibles. El cigüeñal puede construirse en un alambre fuerte, como el de las perchas de la ropa, que no se doble durante el funcionamiento del motor. El cigüeñal descansa sobre placas de aluminio de 3 milímetros de grosor que sirven de cojinetes. En cada placa se taladran orificios; en el borde superior se cortan sendas entallas donde apoyar el cigüeñal, para luego atornillarlas a la cara interior de un brazo de madera [*figura 1*].

El volante es una polea de 20 centímetros de diámetro con un surco pensado para montar una correa. En su diámetro interior se encaja un taco de madera, en cuyo centro se practica un orificio para acomodar el cigüeñal. El alambre se fija al taco con epoxy y el taco se asegura a la polea mediante el tornillo prisionero. El alambre del cigüeñal debe sobresalir de los cojinetes de tal manera que sus extremos puedan cortarse y doblarse dejando sendos tramos de unos cinco centímetros perpendiculares al eje del cigüeñal. Estos tramos finales deben, además, quedar perpendiculares uno al otro vistos de costado.

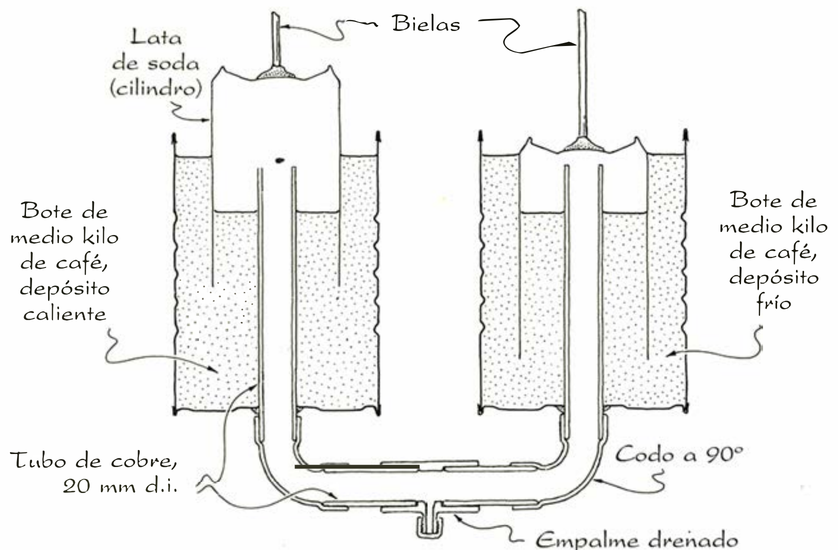
Con una sierra para metales se cortan las tapas de dos latas de refresco. Se ponen boca abajo y se encolan sendas varillas de madera a sus tapas del fondo. Estas bielas deben ser de unos cinco milímetros de diámetro por unos 90 centímetros de largo. Como pegamento. Tailer sugiere un tipo epoxy de secado lento, que soportará el calor mejor que los de secado rápido. Después, durante el montaje final del motor, el extremo superior de cada biela se encola o fija con cinta adhesiva a una tira de aluminio de 3 milímetros de grueso, montada ésta con tuercas y arandelas en un perno largo. Este tornillo atraviesa, además, otras dos bandas de aluminio que están unidas a los extremos exteriores de las manivelas con un perno más corto y una tuerca. El conjunto completo recibe el nombre de muñequilla de cigüeñal.

Los depósitos son botes de café de medio kilo. El tubo que los une está hecho de tubería de cobre de 20 milímetros de diámetro interior. Antes de conectarlos, hay que fijar a cada lata un trozo de 15 centímetros de longitud. En la superficie del fondo de cada lata se practican cortes radiales con una navaja y el trozo de tubo se fuerza hacia dentro, abriéndose paso por entre las aletas que hicieron los cortes y dejando fuera de la lata unos dos centímetros de tubo.

La juntura entre el tubo y el bote puede cerrarse y afianzarse con epoxy de endurecimiento lento; la soldadura de estaño da mejor resultado. Si se prefiere esto último, se lija la superficie a soldar del tubo, se reparte fundente en esa superficie y en la zona correspondiente al bote y se aplica el soldador sobre la zona de soldadura para que derrita el fundente. Una vez preparados ambos botes, se colocan sobre sus extremos abiertos. Seguidamente, se lijan y cubren de fundente los interiores de los codos de los tubos y se sueldan los codos en su posición. Se añaden ahora dos trozos cortos de tubería con un empalme entre los dos provisto de drenaje. Se sueldan unos a otros, excepto la pieza que se introdue en el codo del depósito frío. Esta última conexión se asegura con algunas vueltas, bien prietas, de cinta de vinilo, de modo que el conjunto pueda posteriormente desmontarse si hay que añadir o remplazar un regenerador. Si no fuera posible disponer de un trozo de tubo con drenaje, bastará con abrir un orificio en un tubo corriente, suavizar los cantos y luego cerrarlo con un tapón de madera o de goma. Constrúyase un chasis sobre el que instalar los



4. Las ocho etapas del funcionamiento del ingenio de Tailer.



5. Montaje de tubos y latas.

depósitos y que facilite un buen acceso al drenaje.

Después se pasan las varillas que conforman las bielas por las armellas atornilladas al pie que soporta el aparato; se fijan a las bandas metálicas externas de las muñequillas tal como se describió antes. Para una carrera de unos 30 milímetros, los tornillos se ajustan en la muñequilla de modo que el tornillo largo pase a unos 20 milímetros por debajo y por encima del eje cuando gire el volante. Para que el volante tenga una masa suficiente que le permita completar la vuelta cuando el motor se ponga en marcha, hay que añadirle peso; para ello, sujétensele tornillos o pernos con cinta adhesiva. Se engrasan entonces los cojinetes y se comprueba si el volante y las latas se mueven sin dificultad.

Para poner a punto el motor, se rota el cigüeñal hasta que las manivelas queden a 45 grados respecto a la vertical. Luego, con el drenaje abierto, se llena el depósito frío de agua fría hasta que rebose el tubo de interconexión y salga por el orificio de drenaje. Después, se echa agua caliente al depósito caliente hasta que también rebose. Se cierra el drenaje y se empieza a calentar el depósito caliente; puede hacerse con un soplete de propano o un mechero Bunsen, por ejemplo.

La velocidad de rotación del volante depende de la diferencia de temperatura entre los dos depósitos. Por ejemplo, uno de los motores de Tailer giraba a 20 vueltas por minuto cuando las temperaturas del agua eran de unos 95 y de 16 o 17 grados centígrados, pero se aceleró hasta las 28 vueltas por minuto cuando el agua caliente se acercó más al punto de ebullición. El funcionamiento del motor puede mejorarse rellenando parcialmente el tubo de interconexión con tiras metálicas enrolladas que actúen de regenerador. Cuando Tailer añadió una esponja así a su motor, éste subió hasta casi una vuelta por segundo.

El lector, además de jugar con la temperatura, podría tratar de estudiar la influencia de otros parámetros en el artefacto de Tailer. Si se varía la carrera, ¿rotará más rápido el volante? ¿Qué pasará si el ángulo entre las manivelas es distinto del de 90 grados que hemos mencionado? (Y además, por supuesto, ¿por qué es importante ese ángulo y por qué arrastra la manivela caliente a la fría?) ¿Hay otros materiales que, actuando como regeneradores, mejoren nuestro motor? ¿Funcionará éste mejor si remplazamos el agua por otro líquido? (¡No usar líquidos inflamables o que puedan explotar!) ¿Qué ocurre si alteramos la longitud de las bielas para aumentar o disminuir la altura media de la columna de aire en las latas?

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE STIRLING ENGINE. Graham Walker en *Scientific American*, vol. 229, n.° 2, págs. 80-87; agosto de 1973.

STIRLING ENGINES. Graham Walker. Oxford University Press, 1980.

LIQUID PISTON STIRLING ENGINES. C. D. West. Van Nostrand, 1983.

OTHER EXTERNALLY REVERSIBLE CYCLES. J. B. Jones y G. A. Hawkins en *Engineering Thermodynamics: An Introductory Textbook*. John Wiley & Sons, 1986.

PRINCIPLES AND APPLICATIONS OF STIRLING ENGINES. Colin D. West. Van Nostrand Reinhold Company, 1986.

Juegos de ordenador

Programas de autómatas celulares crean el mundo alámbrico y otras amenidades

A. K. Dewdney

"El mundo es el tablero; las piezas, los fenómenos del universo; las reglas del juego, las que llamamos 'leyes de la Naturaleza'."

—THOMAS HENRY HUXLEY,
A Liberal Education

Si un tablero de ajedrez puede representar el mundo, también puede hacerlo un autómata celular. Su rejilla cuadriculada es capaz de alojar muchas más piezas que el ajedrez; existen para él una miríada de posibles reglas. Mejor todavía, sus colores no están limitados al blanco y al negro, sino que cubren el espectro entero. ¿Qué es un autómata celular? Por lo que atañe a los ejemplos de este mes, es un plano bidimensional infinito enlosetado con cuadrados, más una colección de estados y un reloj. Cada casilla o cuadrado se encuentra siempre en alguno de los estados disponibles. En cada golpe de reloj, cada casilla cambia o conserva su estado de acuerdo con ciertas reglas aplicables a su entorno.

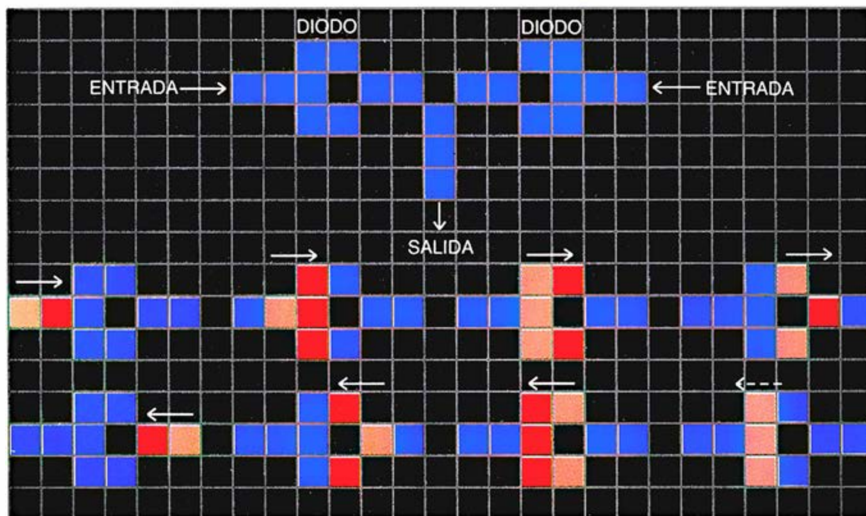
Me han llamado hace poco la atención dos paquetes de programas generadores de autómatas celulares: el llamado "la pecera fantasma" (THE PHANTOM FISH TANK, en su título original) y el "laboratorio de autómatas celulares de Rudy Rucker" (RUDY RUCKER'S CA LAB). Quienes carezcan de conocimientos especiales de programación podrán ahora explorar ciertos autómatas celulares célebres, amén de crear mundos celulares de invención propia.

Muchos han sido los autómatas celulares descritos en esta sección al pasar los años. En octubre de 1970, en las páginas de "Juegos matemáticos" de *Scientific American*, Martin Gardner era el primero en festejar el nacimiento del autómata llamado Vida, descubierto por el matemático John Horton Conway, de la Universidad de Cambridge. Vida está repleto de curiosas estructuras, estables unas y mudables otras. El crecimiento de estas estructuras remeda, en formas harto curiosas, el desarrollo de una colonia de bacterias. En octubre de 1988, esta sección presentaba un autómata celular que simulaba una reacción química automantenida. Más recientemente, en octubre del año pasado, presenciamos la evolución de un autómata celular, llamado espacio cíclico, que, partiendo de un estado de desorden aleatorio, llegaba a crear motivos de centón de hermosas espirales cristalinas en disputa por el espacio disponible.

Cada uno de estos autómatas celulares requiere distintos sistemas de reglas, que gobiernan la forma en que los estados revolotean por entre las casillas. Tradicionalmente, para experimentar con un nuevo autómata celular era preciso preparar un programa nuevo que plasmase sus reglas. ¿No sería buena cosa disponer de un único sistema que englobase a todos los autómatas celulares posibles?

Tal hubo de ser, sin duda, el pensamiento que movió a Brian Silverman para producir "la pecera fantasma", allá por 1987. (Silverman es director de investigación en Logo Computer Systems, una firma de Montreal dedicada a la producción de programas; fue uno de los promotores del ordenador "mecano" descrito en esta sección en el mes de diciembre del año pasado.) La pecera fantasma supone caprichosamente que la pantalla del ordenador es una pecera y que las extrañas configuraciones que a veces se agitan y deslizan por el espacio celular son "peces". Mi autómata celular favorito entre los que componen la batería de programas de Silverman nos permite construir un sencillo ordenador en el seno de un espacio celular bidimensional. Yo lo llamo "mundo alámbrico".

Con el editor de pantalla de que está provista "la pecera fantasma" resulta posible diseñar y animar "líneas conductoras" ("alambres") y "puertas lógicas". En teoría, con estos dispositivos celulares se podría construir un ordenador digital todo lo potente



1. *Puerta O, protegida por diodos (*arriba*). En el sentido de paso del diodo, el electrón lo atraviesa (*secuencia superior*), pero queda bloqueado al intentar el paso en el sentido contrario (*secuencia inferior*).*

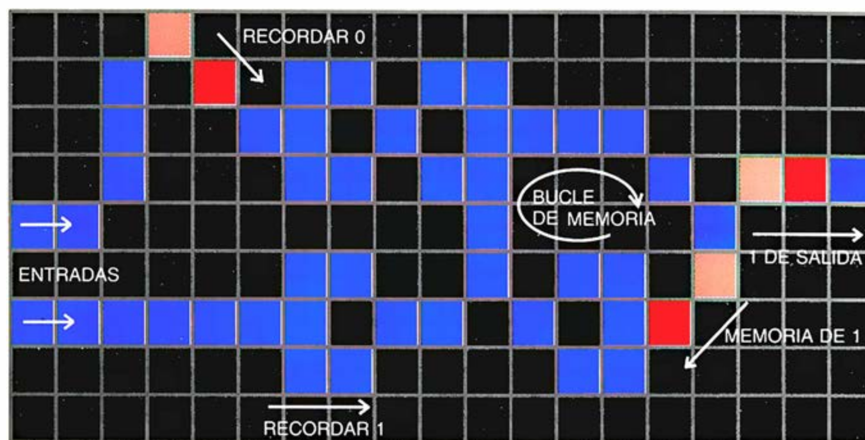
que uno quisiera; en la práctica, la escala del ordenador "alámbrico" se limita a unas pocas puertas y líneas de conducción.

Un puñado de tales dispositivos es más que suficiente, empero, para impresionar a cualquier experimentador ávido con las ilimitadas posibilidades del "mundo alámbrico". Los bloques constructivos del mundo alámbrico consisten en hileras de casillas cuadradas. En un instante dado, cada una de las casillas puede encontrarse en uno de cuatro estados posibles. En lugar de numerar los estados, se les ha dado nombre: casilla de fondo, conductora, cola de electrón y cabeza de electrón. Un par de casillas adyacentes, cabeza de electrón la una y cola de electrón la otra, componen un "electrón".

Poco importa, claro está, qué nombres le sean dados a estas casillas, pero los nombres sí tienen importancia cuando se llega a las reglas. En cada turno del juego, las cabezas de electrón se convierten en colas; las colas pasan a ser casillas conductoras y, en ocasiones, las casillas conductoras se convierten en cabezas de electrón. Las casillas de fondo nunca cambian. El cambio o permanencia de una casilla conductora depende de los estados de sus vecinas, entendiendo por tales las ocho que la tocan por uno de sus lados o en un vértice. Las células conductoras cuyo entorno contenga una o dos cabezas de electrón se convierten, a su vez, en cabezas de electrón, pero las celdillas conductoras en cuyo entorno se apretujen tres o más cabezas de electrón siguen siendo casillas conductoras.

Sin necesidad de reglas más complicadas que éstas, el mundo alámbrico está listo para entrar en acción. No obstante, distribuyendo al azar una colección de celdillas electrónicas y de casillas conductoras no lograremos seguramente sino cortocircuitos. Para computar algo, el proyectista humano habrá primero de ensamblar dispositivos lógicos a partir de las casillas de fondo y de conducción. Seguidamente, puede ensayar los dispositivos introduciendo electrones, que se deslizan a lo largo de hilos que no se parecen a ninguna otra cosa terrena. En la construcción de la computadora celular está la mitad de la diversión.

Para construir un hilo conductor en el espacio celular del mundo alámbrico, basta alinear varias casillas conductoras y rodearlas de casillas de fondo. Para introducir un electrón en la línea, se sustituye la primera casilla conductora por una cola de electrón



2. Un elemento de memoria del mundo alámbrico, a punto de olvidar un 1 y recordar un 0.

y, la segunda, por una cabeza de electrón. El electrón se desplazará a lo largo del hilo por simple consecuencia de las reglas del mundo alámbrico: en cada golpe del reloj celular, la casilla conductora situada delante del electrón se convierte en cabeza de electrón, al tiempo que la cabeza del electrón se convierte en cola y ésta revierte, por último, al estado de casilla alámbrica.

Pero, ¿cómo plasmar los elementos decisorios de la computadora mundoalámbrica? Examinemos la configuración de la parte superior de la figura 1. Los dos hilos horizontales corresponden a líneas de entrada de una puerta O, dispositivo que hará bajar un electrón por la línea vertical, si penetra un electrón por uno de los hilos de entrada, o por ambos. Parecería a primera vista que la puerta funciona también sin necesidad de los extraños abultamientos rectangulares situados sobre las líneas de entrada; pues, si una cualquiera de las líneas de entrada (o ambas) porta un electrón, al menos uno llegará a la unión, y sin duda entrará un electrón en la línea de salida. El problema se plantea cuando llega a la unión un solo electrón, ya que no sólo continuará bajando por la línea de salida, sino que propagará también una copia de sí mismo a lo largo de la otra línea de entrada. La situación sería desastrosa si también penetrase en el dispositivo otro electrón por la misma línea y colisionase con el electrón perdido, pues se cancelarían mutuamente.

Las manecillas rectangulares de las líneas de entrada impiden tales colisiones. Se trata de diodos celulares, que sólo permiten a los electrones viajar en una de las dos direcciones. El diodo consiste en un rectángulo de tres por dos, formado principalmente por casillas conductoras. La casilla central situada sobre uno de los lados del rectángulo es una celdilla de fondo, que crea una ruptura en la línea. Nada más se necesita, como muestra el diagrama de la figura 1. Un electrón que provenga del lado continuo se escinde en dos y excitará después la célula conductora ubicada del otro lado del hueco. Un electrón que avance en sentido contrario se escinde en tres electrones que no pueden propagarse por la línea, porque la casilla conductora adyacente a ellos no puede ser excitada por tres electrones. La puerta O se construye fácilmente colocando un diodo en cada una de las líneas de entrada.

El repertorio de componentes necesarios se completa con dos tipos de puertas más, a saber: un elemento de memoria y una puerta NO, también llamada inversor. Si nos proponemos diseñar un ordenador completo, sin duda será preciso establecer un convenio de temporización de las señales internas. En los ordenadores electrónicos ordinarios, la señal binaria no consiste en electrones individuales, sino en dos tensiones eléctricas constantes, que pueden ser "alta" (1) o "baja" (0). En el mundo alámbrico, la presencia o ausencia de un electrón será interpretada como un 1 o un 0, respectivamente. No obstante, es preciso orquestar los acontecimientos computacionales en el seno de la computadora celular. Conviene separar en el tiempo las señales electrónicas individuales. Un número constante de ciclos de reloj separarán las señales consecutivas a lo largo de una línea cualquiera de nuestro ordenador. Si ese número constante de ciclos es T, cada componente de la computadora recibirá, cada T ciclos, un electrón individual (1) o ningún

electrón (0). La pregunta inmediata pasa a ser: ¿cuál será el valor mínimo de T para que el sistema funcione?

Dejaré a cargo de los lectores la amena tarea de diseñar un inversor, no sin facilitarles algunas indicaciones. Se prepara un bucle de células conductoras en torno al cual puede circular un electrón cada T segundos. Derivemos el bucle por una línea conducente a una configuración que recuerda a un diodo conectado en sentido de no conducción. Un hilo procedente del mundo exterior aporta un electrón (o un no-electrón) cada T ciclos. En el caso de que llegue un electrón, el procedente del bucle penetra en el cuasi-diodo justo a tiempo para cancelarlo. Si no llega ninguno, el electrón del bucle escapa por la línea de salida.

Desde el punto de vista lógico, el mundo alámbrico puede equiparse ya con un repertorio completo de componentes. Los inversores y las puertas O bastan para construir cualquier función lógica que se desee, desde los multiplexadores (circuitos que dirigen el flujo de señales en el seno del ordenador) hasta la UCP (unidad central de procesamiento, circuito de complejidad obnubilante que ejecuta los programas del ordenador). No vamos a intentar tales proezas en este artículo, que se contentará con señalar que se dispone ya de todo lo necesario para construir un ordenador.

Pero, ¿y la memoria? ¿Cómo construiremos los registros de memoria de una computadora? La receta estándar consiste en utilizar una báscula biestable compuesta por los elementos lógicos que uno tenga a mano. A mí me resulta más atractiva la posibilidad de diseñar a la medida un elemento de memoria. Vemos en la figura 2 el dispositivo que ideé con ayuda de "la pecera fantasma" (que me sirvió para trazarlo y ensayarlo).

El elemento de memoria se vale de un bucle, en cuyo seno circula un electrón cuando el elemento ha de recordar un 1; cuando ha de recordar un 0, no hay en él electrón alguno. Dos líneas de control cambian el contenido del elemento de memoria. Un electrón que avance a lo largo de la línea inferior, señalando el nuevo valor a recordar, un 1, penetra en el bucle por el ángulo inferior izquierdo. Si en el elemento existe ya un electrón, la llegada del nuevo no altera para nada la situación: el electrón incidente se inyecta en el circuito en el instante preciso en que pasaría por el punto de inyección un electrón que pudiera encontrarse ya en él.

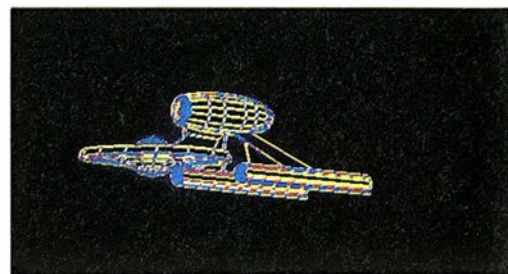
La línea superior introduce no-electrones en el bucle. Un electrón que penetre en el circuito a través de la línea superior señala que el circuito ha de recordar un 0 hasta nuevo aviso. El electrón atraviesa un diodo de protección y penetra en otro diodo. Este último forma parte, en realidad, del bucle de memoria. El electrón de señal provoca que las tres casillas del diodo situadas del lado del bucle se conviertan en electrones en el momento exacto en que un electrón circulante estaría a punto de penetrar desde abajo en el diodo. El resultado es la efectiva extinción del electrón circulante, al convertir en colas de electrón a todas las casillas que un instante antes fueron cabezas de electrón. Estas últimas son refractarias y no pueden convertirse otra vez en cabezas antes de todo un ciclo. El bucle "olvida" el 1 y ahora recuerda un 0. Evidentemente, si estuviera antes recordando un 0, no estaría circulando electrón alguno. En ese caso, un electrón de la casilla inferior del diodo se propagaría al interior del bucle en dirección "aguas arriba". Pero no hay que preocuparse: este impulso errático se bloquea en otros dos diodos antes de que pueda causar daño alguno. Uno de los diodos forma parte del bucle; el otro protege la línea de ingreso inferior.

¿Qué duración debería tener el ciclo de reloj para garantizar que todo funcione sin tropiezo? El mínimo bucle de memoria que yo pude conseguir requiere 13 cuentas de reloj. A menos que algún lector sepa diseñar un elemento de memoria más rápido, que efectúe en menos tiempo todo cuanto hace el mío, tendremos que contentarnos con un gran ciclo de 13 golpes de reloj.

Silverman se muestra entusiasta acerca del potencial de cómputo de los autómatas celulares, e imagina una computadora celular que no sólo opera basándose en circuitos del tipo que he descrito, sino que es capaz de modificar sobre la marcha los circuitos para optimizar el cómputo que se está efectuando.

Más amplio todavía es el futuro que Rudy Rucker contempla para los autómatas celulares. "Tengo la impresión de que la mayor de las tareas de finales del siglo XX es la construcción de máquinas vivas... Esta es la obra magna del científico informático; tan cierto como que la construcción de la catedral de Notre Dame... fue la obra magna del artesano medieval."

Tanto si semejante proyecto es viable como si no, los lectores pueden desde luego pasar amenos ratos intentándolo, ahora que Rucker en cola-



boración con Autodesk (una compañía californiana dedicada a los juegos computarizados) ha producido la batería de programas llamada RUDY RUCKER'S CA LAB. (Rucker es un autor de ficción científica que abandonó las incertidumbres de la vida de autor independiente por la vida relativamente segura, aunque apasionante, de docencia en las cercanías del "valle del silicio" californiano.). El "laboratorio" de Rucker consiste en dos programas, llamados RC y CA. El primero de ellos, confeccionado por Rucker, le permite al novicio experimentar con un muestrario de diversas reglas interesantes. Entre ellas figuran las de autómatas celulares célebres, como Vida y el juego de votación [véase "Juegos de ordenador", en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1985] y cierto número de reglas nuevas de dispar denominación: "desvanecedores", "ascii" y "el cerebro de Brian" (un autómata celular que describió Silverman). La sección CA, preparada por John Walker, de Autodesk, contiene recursos especiales para poder crear cualquier autómata celular que se desee.

Uno de los autómatas celulares favoritos de Rucker, al que ha llamado "alfombra", crea motivos coloreados, dispuestos en muestrarios ovalados y en bandas elípticas. Estos motivos se parecen bastante a las alfombras de ganchillo que mis antepasados confeccionaban en Lancaster County, Pennsylvania; pero las alfombras creadas por el autómata celular están vivas: los colores avanzan o retroceden sin cesar, y el motivo cambia continuamente ante nuestra mirada. ¿Cómo funciona el mundo "alfombrado" de Rucker?

En el autómata celular "alfombra", cada casilla tiene ocho vecinas, cuatro a lo largo de los lados y cuatro en los vértices. Para decidir cuál de los 256 estados posibles va a adoptar en el ciclo siguiente, cada casilla invoca un proceso de cuatro estadios. El primer paso consiste en calcular el promedio de los ocho estados vecinos.



3. *La nave estelar* Enterprise *se disuelve en el espacio celular llamado Vida.*

En segundo lugar se procede a truncar el promedio resultante y convertirlo en entero, para lo que se elimina la parte decimal. La tercera fase consiste en sumarle a este número un incremento (seleccionado por el usuario). Por último, la suma resultante "se enmascara" con otro número suministrado por el usuario. "Enmascarar" significa que la representación mediante dígitos binarios del nuevo estado de la casilla se combina según reglas lógicas con la representación en igual forma del número suministrado por el usuario. Por ejemplo, si el resultado numérico del cómputo recién esbozado resultase ser 107 y el número de máscara fuese 224, entonces el proceso de enmascaramiento compararía las representaciones binarias de ambos números: 107 es igual a 01101011 en binario; 224 es igual a 11100000. La máscara produce un nuevo número binario que solamente tiene unos en los puestos donde ambos números tengan unos. Así, pues, en este ejemplo, el resultado del proceso de enmascaramiento sería 01100000. De hecho, para obtener el estado siguiente, la máscara cercena los dígitos binarios de orden bajo del número computado. Evidentemente, se podría utilizar como máscara el número 255 (11111111), en cuyo caso los resultados del cómputo quedan intactos y el estado siguiente de cada casilla es, en esencia, el promedio de los estados vecinos, incrementado en la cantidad especificada por el usuario. Incluso incrementos tan pequeños como 1 producen pautas que tienden a extenderse o a contraerse; y mantienen "vivas" las alfombras.

El programa CA permite a las almas inquietas y ansiosas de explorar a su capricho especificar cualquier regla de su gusto en distintos modos y lenguajes. Se puede especificar el tamaño del espacio celular, así como los efectos sobre una casilla que atraviesa las fronteras. ¿Saltará la casilla de lado a lado de la pantalla, o se perderá errática por la memoria del ordenador?

Los jugadores menos serios tienen siempre la posibilidad de seleccionar su autómata celular favorito de entre múltiples demostraciones y arrancar después el autómata partiendo de diversas configuraciones iniciales. Empero, puede resultar fastidioso especificar el estado inicial de 8000 celdillas. Felizmente, Rucker ha facilitado la amena opción de utilizar como creaciones iniciales figuras reconocibles, como la del navío estelar *Enterprise*, que vemos en la ilustración 3. Sus elementos de imagen son, en realidad, las casillas coloreadas de un autómata celular. Arranquemos el autómata celular a partir de esta configuración inicial y la nave *Enterprise* se teje y entreteje hasta convertirse en una alfombra de alta tecnología. Hagamos funcionar un autómata celular llamado "calor", que simula el flujo calorífico en los materiales, y la *Enterprise* se torna roja, violeta y color *chartreuse*, al tiempo que se va difundiendo lentamente en el cosmos. (La tripulación no tiene forma de huir por teletransporte.) O bien pongamos en marcha el autómata celular llamado Vida, y observaremos desintegrarse el navío estelar, que se descompone en una nube de patines deslizadores, intermitentes, haces y colmenas.

Se puede encargar una "pecera fantasma" (PHANTOM FISH TANK) para ordenadores Apple II escribiendo a Brian Silverman, Logo Computer Systems, Inc., 3300 Cote Vertu, Montreal, Quebec, H4R 2B7. El programa RUDY RUCKER'S CA LAB para PC IBM PC puede serle encargado a Autodesk, Inc., 2320 Marinship Way, Sausalito, CA 94965.

En el mes de agosto del año pasado desfiló por esta sección una gran parada de prosa y poesía o, mejor dicho, una gran parodia de prosa y poesía. MARK V. SHANEY, un programa que lee texto inglés para luego producir versiones monstruosamente distorsionadas del mismo, funciona basándose en las cadenas de Markov. El algoritmo subyacente es de una sencillez ridícula. Al tiempo que el programa va inspeccionando el texto, va construyendo una tabla de los pares de palabras que siguen a otras dos. Dicho de otra forma, para cada pareja de palabras consecutivas que el programa encuentra en el texto objeto de examen, el programa construye una lista de todas las palabras que siguen a ese par cada vez que aparecen en el texto. Las frecuencias de aparición de tales palabras se convierten fácilmente en probabilidades al final del proceso, por lo que, al propio tiempo que MARK V. SHANEY regurgita el texto, se limita a observar las dos últimas palabras que ha impreso, elige una continuación basándose en las probabilidades correspondientes e imprime después tal continuación como palabra consecutiva. El proceso se repite ad nauseam.

Me ponía la carne de gallina pensar que MARK V. SHANEY pudiera hincarle el diente a aquella sección misma, reduciendo a un galimatías mi propio texto, tan cuidadosamente construido. Kenneth A. Bullis, de Campbell, California, dio cuerpo y alma a MARK V. SHANEY en su ordenador Macintosh Plus; enseguida, sin la menor consideración hacia mis sentimientos personales, procedió a mecanografiar la sección entera de "Juegos de ordenador" del mes de agosto. He aquí los resultados que la primera pasada produjo en mi artículo:

"Ten cuidado de una tabla de cadenas de Markov para todas las palabras que rimen con sol. Al examinarlas, el ojo de uno podría aterrizar en la naturaleza de un sólido o un líquido. Mira alrededor. Cuáles son los únicos que toman parte en las hojas de las plantas verdes. Es solamente que la primera parada del Mandelbus puede ser obtenida escribiendo Pike en el momento en que los payasos tristes entran en su museo del dolor."

Guy Ottewell, de Greenville, Carolina del Sur, pensó que los programas de poesía no funcionaban tan bien como SHANEY. Se ocupó del soneto producido con ayuda del progra-

ma de PAC (poesía asistida por ordenador) de Michael Newman. El defecto no residía en el programa, sino en el poeta. El programa, incidentalmente, funciona en ordenadores IBM y puede ser adquirido en tres partes: el procesador de poesía, POETRY PROCESSOR, NERD II (acrónimo que denota "Newman's Electronic Rhyming Dictionary") y ORPHEUS A-B-C. Si lo prefieren los lectores, pueden encargar los tres en un paquete llamado POETRY PROCESSOR PACKAGE. Los programas pueden adquirirse por intermedio de la *Paris Review*, 541 East 72 Street, New York, NY 10021.

Otro diccionario de rimas es el producido por Carl Wurtz, de Burbank, California. QUICKRHYME, nombre que Wurtz da a su programa, ha resuelto al parecer muchas de las cuestiones más espinosas sobre computación de rimas, y no se reduce a su mero listado. Los lectores interesados en QUICKRHYME pueden ponerse en contacto con Wurtz en "a priori", 859 Hollywood Way, Suite 401, Burbank, CA 91510.

En octubre de 1989, esta sección exploró un autómata celular al que su descubridor, David Griffeath, de la Universidad de Wisconsin en Madison, había dado el nombre de espacio cíclico. Apenas puedo hacer más que tomar una muestra de los interesantes experimentos que se están efectuando a resultas de ello por centenares de concienzudos aficionados de todo el *hinterland* científico.

El universo celular de Griffeath se llama cíclico a causa de los hábitos "tróficos" de las células que lo componen. Una casilla en estado k devorará a una casilla vecina que se encuentre en estado k-1. Sea n el número de estados permitidos; si sucede que k es 0, el estado inmediatamente inferior será n-1. La cadena trófica se convierte así en ciclo trófico. En el caso de que el espacio celular se encuentre inicialmente lleno de estados aleatorios (detritus), siendo n grande, habrá al principio escasa actividad, porque es bastante improbable que cualquier casilla particular sea adyacente a una casilla del estado inmediatamente inferior.

Harry J. Smith, de Saratoga, California, ha trabajado con un espacio de 320 por 200, en el que cada casilla admite un total de 14 estados posibles. Al principio, alrededor del 25 por ciento de las casillas cambian sus estados en cada iteración; pero, hacia las 15 generaciones, el porcentaje cae a menos del tres por ciento. Entonces —dice Smith— empiezan a formarse los parches de intensa actividad que Griffeath llama gotitas. Al ir aumentando las gotitas, el porcen-

taje de casillas que cambian de estado en cada iteración crece con regularidad; ahora bien, hacia la generación 150, tal porcentaje se acelera más todavía hasta que se alcanza la fase "demonio", en que todas las casillas están cambiando de estado a cada iteración.

En el artículo sobre espacio cíclico retaba yo a los lectores a que descubrieran un pequeño rectángulo de casillas que no contuviera ningún defecto y que, con el tiempo, llegara a producir uno. Lo que Griffeath entiende por un defecto es una cadena celular cerrada que contiene un ciclo contiguo de todos los estados posibles. Esa es la semilla del diablo. La solución más sencilla a este problema procede de Marlin Eller, de Seattle, Washington. ¿Qué le sucede al siguiente rectángulo de 3×3 en un universo cíclico de ocho estados?

0	1	2
7	4	3
7	5	6

John D. Brereton, de West Haven, Connecticutt, desarrolló una ingeniosa pantalla de presentación para mostrar en qué consistía, en realidad, el autómata celular cíclico. Produjo en su pantalla, no una imagen del espacio cíclico, sino dos, una junto a la otra. El espacio de la izquierda muestra la última generación, pero el espacio de la derecha exhibe solamente las casillas que cambian su estado al ser computada la generación siguiente. Incapaz de dejar las cosas cual las dejamos Griffeath y yo, Brereton estuvo "bricoleando", y probó a contar como vecinas no sólo las cuatro casillas situadas a lo largo de un lado, sino también aquellas que tocaban los ángulos de una casilla. El nuevo espacio excitó la sensación de descubrimiento: "Al aproximarnos a este extraño planeta, vemos al principio una cubierta de nubes multicolores, bajo la cual no hay detalles visibles. Al aproximarnos más, descendiendo a través de ciclos sucesivos, empiezan a resultar vagamente distinguibles a través de los claros de las nubes motivos coloreados sobre el suelo. Aparecen después distintas fronteras de diversos campos coloreados, seguidos por pequeños edificios...". Pero yo dejaré aquí la descripción, para que la completen los lectores que deseen visitar el planeta de Brereton.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CELLULAR AUTOMATA MACHINES. Tommaso Toffoli y Norman Margolus. The MIT Press, 1988.

Libros

De cultura y biología, observaciones planetarias, Borelli, manual y fantasmas en mecánica cuántica

Antonio Prevosti, José Luis Comellas, Luis Alonso y José M.ª Sancho

El hombre biocultural. De la molécula a la civilización, por Yves Christen. Ediciones Cátedra; Madrid, 1989.

La evolución biológica y la evolución fisicoquímica han precedido a la evolución cultural, que ha dado origen a las sociedades humanas. En éstas, por tanto, además de las leyes culturales, rigen también las del mundo inorgánico y del biológico. No obstante, igual que el cumplimiento de las leyes de la física y de la química en los seres vivos no explica todas sus propiedades, para entender las sociedades humanas no bastan los modelos puramente biológicos. En nuestro planeta, la evolución ha dado origen a sistemas de creciente complejidad, con estructura jerarquizada. Los sistemas más primitivos y sencillos se han ido integrando progresivamente en otros más complejos. Los dos pasos más importantes en este proceso de organización progresiva son la emergencia del genoma, portador de información codificada en los seres vivos, y la del cerebro humano, base del desarrollo de la cultura en el hombre. Ambos han generado un cambio cualitativo en las propiedades de los sistemas donde se han producido.

El libro de Yves Christen *El hombre biocultural* no tiene en cuenta estas características del proceso evolutivo. Presenta a las sociedades humanas como sistemas puramente biológicos, que evolucionan por selección natural y están regidos por las leyes de la herencia biológica. En la historia del pensamiento, principalmente del pensamiento moderno relacionado con el desarrollo de la ciencia, es frecuente el error de utilizar las características de un nivel de organización para interpretar, totalmente o en sus rasgos más importantes, las de otros niveles. Así, hasta hace muy poco la filosofía de la ciencia no ha comenzado a dejar de identificarse con la filosofía de la física, debido a que los organismos vivientes tendían a considerarse sólo sistemas fisicoquímicos complejos. El darwinismo social y algunos sociobiólogos, en cuyas ideas se fundamenta el libro de Christen, llevan a cabo una reducción paralela del nivel cultural al biológico.

El cerebro humano es un resultado de la evolución biológica. En su funcionamiento se cumplen las leyes de la biología, la física y la química. Sus propiedades son, por tanto, hereditarias y resultado de la evolución biológica, pero sus productos no están regidos únicamente por las leyes de la biología, pues integrados forman un nivel de orden superior al biológico, el nivel cultural, en el que se manifiestan propiedades inéditas en los otros niveles.

La aplicación del modelo darwinista de la evolución biológica a las sociedades humanas, al colocar en el mismo saco cosas cualitativamente diferentes, no sólo es una simplificación empobrecedora y errónea de la realidad cultural, sino que suele ir acompañada de una visión incompleta y falsa del modelo biológico en el que se basa. Esto está claro en frases como las siguientes del libro reseñado: *Esta simple verdad, el hombre como conquistador absoluto, tiene una significación evolutiva evidente: somos el triunfo de la selección. Un triunfo particularmente imperialista, puesto que está construido sobre la eliminación de los demás.* En realidad, la selección natural no actúa conforme a un plan ni tiene nada que ver con valores inexistentes en la evolución biológica, como implican los términos *conquistador* e *imperialista*. Además, el concepto de selección natural utilizado en la cita anterior es equívocamente unidimensional. La supervivencia, que es la consecuencia de la selección, se alcanza por caminos muy diversos. Puede ser por la competencia, pero también, y no en segundo término, estableciendo relaciones nuevas con el ambiente, evitando precisamente la competencia; incluso, la cooperación es, a menudo, la vía del éxito evolutivo. Justamente, el establecimiento de relaciones nuevas con el ambiente tanto físico como biótico, obviando la competencia, conduce a uno de los principales resultados de la evolución biológica, la gran diversidad del mundo viviente. La selección natural es muchas veces un proceso diversificador y no uniformizador como cuando opera mediante la competencia.

No existen fundamentos científicos para afirmar que los rasgos distintivos de la cultura humana son puramente biológicos, que están sometidos a un estricto control genético y son un resultado de la selección natural, como admiten algunos sociobiólogos, entre ellos el autor del libro que comentamos. No hay datos de observación o experimentales que lo indiquen. En lo único en que se basan para admitirlo es en el carácter adaptativo, ventajoso para la supervivencia, que les suponen. El carácter más distintivo del hombre como especie biológica es su cerebro, que ha alcanzado un desarrollo muy superior al que tiene en las demás especies de mamíferos. Utilizando el cerebro los hombres son capaces de pensamiento abstracto y de imaginar (simular) situaciones externas en el espacio y en el tiempo, de donde surgen los valores éticos, estéticos, etc., que se encuentran en la cultura, y los modos no genéticos de transmisión de ésta, entre los cuales el más importante es el lenguaje.

Para todo biólogo que se haya preocupado del fenómeno cultural es obvio que en éste influyen las propiedades biológicas del hombre. Existen complejas interacciones entre las características de ambos niveles evolutivos, igual que entre las características de los sistemas biológicos y las fisicoquímicas de sus componentes. No obstante, la reducción de los niveles evolutivos superiores a los de orden inferior no es correcta. No contempla las características propias de los niveles superiores, que precisamente expresan el avance evolutivo. Así, las facultades de abstracción y de simular situaciones no experimentadas previamente, que son el resultado del funcionamiento cerebral, al comparar y combinar los datos almacenados en su memoria, le permiten al hombre prever el futuro y le dan la posibilidad de elegir, de actuar intencionadamente, es decir, de tener un comportamiento libre. Estas mismas funciones cerebrales son el origen de su capacidad de compasión, en el sentido etimológico de la palabra, de "padecer con", al imaginar la situación de sus semejantes e identificarse con ellos. Esto, unido al ejercicio de la libre elección, es la base del comportamiento ético. El rechazo, por gran

parte de la sociedad humana, de los modelos biológicos utilizados como culturales se debe, precisamente, a que niegan estas características esencialmente humanas.

Conviene señalar que lo anterior no sólo es válido para el darwinismo social y la sociobiología dura, que son el fundamento de *El hombre biosocial* de Christen, sino también para todos los modelos biológicos aplicados a la sociedad humana. En todos los casos hay una mezcla deformadora de las propiedades de ambos niveles. Suele aplicarse a la cultura humana una visión incompleta del nivel biológico, sin otra razón que la defensa de una ideología extrema, pareja a un desconocimiento de la realidad cultural. Tan poco adecuados son los patrones biológicos sostenidos en el libro de Christen como, por ejemplo, el de la simbiosis, la asociación cooperativa entre organismos de distinta especie, con beneficio mutuo. A primera vista puede parecer deseable aplicarlo a la sociedad humana. Mas, el análisis profundo de esta asociación biológica demuestra, como en el caso de la selección natural, que la realidad es bastante más compleja de lo que puede deducirse del concepto superficial de la asociación, que la hace atractiva como modelo cultural. En el mejor de los casos, la simbiosis conduce, en sus fases más avanzadas, a la pérdida de la individualidad de los participantes en la asociación. Se forma una organización de jerarquía superior en la que las propiedades de sus componentes se desvanecen, excepto las correspondientes a la función que adquieren en el nuevo sistema de orden superior, donde quedan integradas. Estas funciones se reducen a lo necesario para la eficacia del nuevo sistema. Una alternativa a este resultado de la evolución de la simbiosis es que uno de los elementos componentes de la asociación adquiera preponderancia sobre las demás, en la nueva organización resultante. Ejemplo de estos resultados de la simbiosis son los orgánulos de las células eucariontes.

En la evolución biológica se prima exclusivamente la eficacia necesaria para la supervivencia. En las sociedades humanas, es obvio que esta eficacia es también indispensable. Mas, debido a la adquisición de conciencia por los individuos que componen estas sociedades, la eficacia sólo puede conseguirse si se asocia con los valores que surgen en el nivel cultural, que no son los del hombre biocultural de Yves Christen. Esto queda claro cuando trata de la libertad diciendo: *... puesto que la propia noción de determinismo genético es inseparable de la libertad invidual. Precisamente porque estamos determinados por nuestros genes disponemos de una forma de libre albedrío: la libertad de ser nosotros mismos*; o, un poco más adelante: *Nunca se repetirá suficientemente: nuestro patrimonio genético, verdadero punto de referencia individual, origen biológico del yo, es lo único que hace de nosotros individuos completos. Preocupándonos de nuestro destino genético no hacemos, por tanto, otra cosa que interesarnos en reconocer y consolidar nuestra libertad.* Es difícil entender la libertad basada en un destino. Además, hablar de destino genético no tiene sentido. No se heredan caracteres determinados, sólo una norma de reacción al ambiente. (A. P.)

PLANETS AND PERCEPTION. TELESCOPIC VIEWS AND INTERPRETATIONS, por William Sheehan. The University of Arizona Press; Tucson, 1988. 324 págs.

La observación del cielo a través del telescopio, iniciada en 1609 por Thomas Harriot y seguida meses después con mayor eficacia por Galileo, permitió los más decisivos avances de la ciencia astronómica. El telescopio supera la simple vista humana en dos cualidades esenciales: aumenta el tamaño aparente del objeto observado y colecta una mayor cantidad de luz. En otras palabras, agranda los objetos y permite ver mayor número de ellos.

También tiene sus inconvenientes: aumenta de forma no deseada los efectos de la turbulencia y otras perturbaciones atmosféricas, disminuye el campo visual, provoca aberraciones en la imagen y no alcanza la definición –en proporción a la superficie aparente– de que es capaz por sí solo el ojo humano.

La fotografía, aplicada al telescopio, comenzó a ser, desde mediados del siglo XIX, un competidor del ojo. La primera fotografía de la Luna, obtenida por John William Draper en 1840, tiene un valor puramente simbólico. En cambio, la primera fotografía de la nebulosa de Orión (M 42) realizada por su hijo Henry Draper en 1860 fue toda una fastuosa revelación. Desde entonces, quedaron divididos los papeles: la fotografía tenía ventaja en la observación de objetos débiles –fondo estelar, nebulosas, galaxias– y el ojo humano mantenía su superioridad en la observación planetaria.

La razón de este reparto de funciones es bien sencilla: la fotografía, a diferencia del ojo humano, suma luz con el tiempo. Una exposición de treinta minutos revela lo que una instantánea es incapaz de recoger. Un fondo oscuro puede transformarse en una maravillosa imagen luminiscente. El ojo humano no posee esa capacidad de almacenamiento cuantitativo en función del tiempo; al contrario, una prolongada observación cansa y ofusca la vista. La vista del ojo humano radica precisamente en su capacidad de captación instantánea. Una décima de segundo de visión basta para retener una imagen en la memoria. En este sentido, nuestro cerebro es una excelente computadora, que permite seleccionar las imágenes más perfectas y sumarlas entre sí, desechando las interferencias: una cualidad que no ha tenido la fotografía hasta las técnicas CCD y la digitalización de imagen.

De aquí que la vista humana haya sido más eficaz que la fotografía en cometidos de alta resolución, de suerte que las mejores imágenes planetarias hasta la aparición de las sondas espaciales han sido los dibujos a pie de telescopio. Y sólo en estos momentos la técnica fotográfica empieza a hacer la competencia a la micrometría óptica en el campo de la medida de estrellas dobles.

Ahora bien, la observación visual telescópica tiene dos inconvenientes. Uno objetivo, la ya mencionada exageración de las interferencias y las aberraciones ópticas procedentes de las limitaciones del instrumento. Por un tiempo –y el libro que comentamos proporciona abundantes testimonios– se discutió si el telescopio era o no capaz de revelar las últimas estructuras del objeto sometido a estudio. Sólo en el siglo XX se llegó a una conclusión negativa. Segundo inconveniente, éste subjetivo: el ojo humano, sometido a las pobres condiciones de la observación telescópica, puede caer en errores de interpretación: exagera las *tendencias* y los *contrastes*, tiende a regularizar las líneas irregulares, a completar lo realmente incompleto, a convertir en figuras lo que no es más que manchas y a unir puntos para imaginarse líneas.

Más aún: la sensación que se espera se percibe con mayor claridad, y adquiere así primacía sobre la que no se espera (ley de James), y, en virtud de un principio psicológico de similar naturaleza, cuando un observador se fía de otro, perfecciona hasta sus errores.

De todo esto y de mucho más habla en su extenso libro William Sheehan, psicólogo y astrónomo, profesor de la Universidad de Arizona. Su prepa-

ración en las dos ciencias le permite desarrollar su temática con indiscutible autoridad. Como observador de planetas con refractor, ha tenido que sufrir las dificultades físicas, fisiológicas y psíquicas que describe, y nadie como él posee capacidad para analizar su naturaleza.

El libro de Sheehan está escrito con ciertas pretensiones literarias, lo cual hace la lectura grata a todo aquel que pueda sobrepasar con comodidad el inglés básico, y conduce por otra parte a digresiones que entorpecen la línea principal del discurso. Si algo no ha cuidado Sheehan es el orden lógico: no cabe duda de que es una cualidad buscada adrede. Cada capítulo trata de un tema específico, aunque muchas veces de acuerdo con una secuencia esperada. Otras veces las digresiones pueden parecer inoportunas.

Poco espacio dedica el autor a las primeras observaciones telescópicas: las de Galileo, Riccioli, Huygens. La confusión de los anillos de Saturno con un planeta triple, un huso agujereado o una esfera con asas (muy típicas "interpretaciones" de una misma imagen) hubieran requerido, quizás, un más completo comentario. Pero Sheehan intenta llegar cuanto antes al punto central de su estudio: el descubrimiento de los planetas como "otros mundos". En su superficie parecían advertirse montañas y formas que recordaban a las tierras y mares de nuestro propio planeta.

El descubrimiento de la "analogía" planetaria fue, sin duda, uno de los más importantes de la ciencia en orden a situar "nuestro" propio papel en el cosmos. El mundo que habitamos ¿será uno de tantos? Semejante consideración sugirió muy pronto la posibilidad de vida extraterrestre, y fue Fontenelle, en 1686, el primero en teorizarla. Desde ese momento creció, lógicamente, el interés por observar los planetas con medios cada vez más perfectos.

Por un tiempo, fue la Luna, el único cuerpo del que se podían trazar mapas detallados, el objeto de la máxima atención. Allí existían cordilleras, cráteres, tierras claras y manchas oscuras que se podían interpretar como mares. Un científico tan serio como W. Herschel llegó a decir que lo único que le faltaba a la Luna para ser otra Tierra era estar habitada. Gruthuisen creyó encontrar cuadrados y formas geométricas, que sólo podían ser obra artificial; el Muro Recto (una falla en el Mare Nubium) fue considerado durante algún tiempo como un logro de la ingeniería, mientras otros observadores no veían más que ruinas (eso sí, de ciudades y templos).

La evidencia se impuso a mediados del siglo XIX. Todo indicaba, y cada vez en mayor grado, que la Luna no poseía atmósfera, y por tanto tampoco agua en estado líquido. Era un mundo inhabitable. Pero la atención de los optimistas se trasladó a otros planetas. Por un momento Venus, el más similar en dimensiones a la Tierra, pareció acaparar el mayor interés. El hecho de que poseyera atmósfera era un incentivo. Pero ese mismo hecho, al comprobarse que tal atmósfera cubre totalmente la superficie venusiana y no nos permite ver detalle alguno de sus supuestos continentes, indujo a aparcar el planeta en la intención de los partidarios de los mundos habitados, para dejarlo como una simple posibilidad.

La atención se concentró, a partir de 1870, en Marte, cuya superficie sólida resultaba visible, y cuyas condiciones de albedo y contrastes cromáticos permitían una mejor definición de detalles. En el disco marciano se divisaban blancos casquetes polares, manchas color ladrillo u ocre, que parecían ser tierras, y otras de color azulado que podían ser mares.

Gran parte del libro se dedica a las observaciones de Marte por Schiaparelli y Lowell. Giovanni Schiaparelli fue un ingeniero milanés experto en canales, que, irónicamente, descubrió los "canales" marcianos (1877). Tales formaciones nunca existieron en la realidad, pero la apreciación del ojo humano, que tiende a unir puntos hasta convertirlos en líneas continuas, le engañó. Schiaparelli no relacionó, en principio, tales fenómenos con obras artificiales; pero por los años noventa, asombrado de la cantidad de líneas rectas que creía distinguir en el planeta vecino, insinuó la posibilidad de que se tratase de vías de irrigación, capaces de llevar el agua fundida de los hielos polares hasta las zonas desérticas del ecuador.

La obra de Schiaparelli, traducida al inglés en 1892 por Pickering, fue conocida meses después por un millonario de Boston, aristócrata, excéntrico y viajero, Percival Lowell. Le faltó tiempo para montar un gran observatorio en Flagstaff (Arizona), que comenzó a funcionar en 1894, y en los años sucesivos, provisto de un nuevo refractor de 24 pulgadas, difundió las más sensacionales noticias sobre la obra de los marcianos. Fue el momento de máxima literatura fantástica sobre nuestros supuestos vecinos; en tanto Schiaparelli imaginaba en ellos una organización socialista, Lowell creía en una sociedad de clases dirigida por una *élite* de genios. Más aún: la sociedad marciana era más vieja y estaba más evolucionada que la terrestre. La sequedad de Marte provocaba una dramática alternativa: o sus habitantes lograban huir de su mundo agonizante, refugiándose en la Tierra (o invadiéndola), o el hombre encontraba un medio de salvar a sus congéneres extraplanetarios.

Lowell difundió por el mundo la leyenda de los marcianos, tan viva a fines del siglo XIX y comienzos del XX, pero al mismo tiempo recibió fuertes contestaciones de científicos como Campbell o Maunder. Lowell, calificado ya en su tiempo como "neurasténico", es finamente estudiado por Sheehan, que lo mismo analiza el mecanismo de su ilusoria visión que su entusiasmo paranoico por difundir sus convicciones. Hizo buena la definición de Freud: "la ilusión es una creencia provocada por el deseo". Poco a poco, la leyenda marciana fue languideciendo, sobre todo tras la enfermedad y muerte de Lowell, y la gloria del observatorio Flagstaff deriva de sus usuarios posteriores, incluyendo el descubrimiento de Plutón por Tombaugh.

El libro de Sheehan, como ya queda indicado, adolece de un cierto desorden, así como de inexplicables vueltas atrás. Es obra de la espontaneidad más que de un guión riguroso. Ello no empece el rigor de su sólida documentación, avalada por infinidad de notas y referencias. También se le puede achacar una dedicación desmesurada a la persona de Lowell, en detrimento de un análisis más genérico sobre el papel de la interpretación de la imagen visual de los planetas. E incluso cabría reprochar al autor su prurito de atender a los casos "patológicos", pasando casi por alto la obra de grandes observadores, como Barnard o Antoniadi, que nos han dejado las mejores y más fieles descripciones de los planetas hasta la época de los *Venera*, los *Mariner*, los *Viking* y los *Voyager*.

Su lectura es recomendable tanto a psicólogos como a astrónomos, y puede ser especialmente útil a aquellos aficionados que todavía hoy siguen realizando excelentes trabajos interpretativos de las imágenes planetarias. Conocer la tendencia del ojo humano –y de su traductor, el cerebro– puede ser el mejor método para corregirlas. (J. L. C.)

ON THE MOVEMENT OF ANIMALS, por Giovanni Alfonso Borelli. (Traducido del latín por Paul Maquet). Springer-Verlag; Berlín-Heidelberg, 1989. **NEUROCIENCIAS Y RE-**

VOLUCIÓN CIENTÍFICA EN ESPAÑA. LA CIRCULACIÓN NEURAL, por Alvaro Martínez Vidal; CSIC, Madrid, 1989.

Mala suerte tuvo Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679) de haber vivido entre Galileo y Newton, diríase. Mala suerte si, además, en la obra referida "en vano buscamos encontrar leyes del movimiento" (C. Truesdell, *Ensayos de historia de la mecánica*, p. 297). Por culpa de esos dos inconvenientes, el nombre del napolitano hijo de español no es familiar a la mayoría de los científicos, si excluimos el grupo de los estudiosos de la iatromecánica, movimiento médico del siglo XVII que se proponía aplicar el mecanicismo galileano y cartesiano a la anatomía y fisiología del cuerpo humano, sano o enfermo.

Por su lado, los buscadores de precursores anotan que demostró que la altura alcanzada, espontáneamente, por un líquido en un tubo era inversamente proporcional al diámetro interior del mismo (capilaridad); que se anticipó al descubrimiento de Pauwels (1935) según el cual, durante la marcha humana, la articulación de la cadera transmite una fuerza que cuadruplica, de lejos, el peso corporal; a Branne, Fischer y al propio Pauwels en el cálculo de la fuerza ejercida por un brazo al soportar una carga en distintas posturas; a Branne y Fischer en la determinación del centro de gravedad del cuerpo humano; a los estudios fotográficos sobre la marcha del caballo [véase *Investigación y Ciencia*, febrero de 1977]; y hasta al descubrimiento de la miosina y actina, a propósito de la contracción muscular... Pero este modo de mirar el pasado es, casi siempre, a fuer de simplista, estéril.

No reputó él ningún demérito ser galileano, con lo que de antiaristotélico, y platónico, ello suponía, ni le conturbaba en su profunda fe. Sabido es que el *Timeo* de Platón compendia la nueva actitud de la ciencia moderna: el orden matemático regula el mundo, cuya versión galileana señala que la matemática es el lenguaje en que está escrito el libro de la naturaleza. Borelli, dándole razón a J. Bernard Cohen cuando afirma que la eficacia de una nueva teoría —revolucionaria— se mide por su extensión a campos distintos de donde nace, se propone: "no sólo ilustrar y enriquecer la parte dedicada a la física mediante demostraciones matemáticas, sino también incluir la anatomía en la física y la matemática no menos que la astronomía" (p. 6).

Hasta entonces se había progresado poco, le escribe en la dedicatoria a la neocatólica reina Cristina de Suecia que sufragaba las costas de publicación, porque ni los médicos ni los filósofos tenían sólidos conocimientos del lenguaje en que estaba escrito el libro de la naturaleza. Los animales son cuerpos y, sus operaciones vitales, procesos o actos que requieren movimientos. Ahora bien, cuerpos y movimientos son el objeto de la matemática. La "geometría" con sus escalas, palancas, poleas, etcétera, constituía el método adecuado para introducirse en las ciencias de la vida. (Fue una pena que los zoólogos y botánicos no le secundaran. La situación actual nos confirma que los biólogos procedentes del campo de la física y la química son los que han hecho avanzar la ciencia.)

Borelli sí estaba preparado para esa labor. Enseñó matemática en la Universidad de Pisa (1656-66); publicó *Euclides restitutus*, con glosa de los postulados del alejandrino; preparó los libros V, VI y VII de las *Cónicas* de Apolonio, y realizó incursiones en el campo de la astronomía, con sus *Theoricae mediceorum planetarum ex causis physicis deductae*, entre otros. De manera más directa, preparan su libro sobre el movimiento de los animales el dedicado a la fuerza de la percusión (*De vi percussionis*) y el tratado sobre los movimientos naturales que resultan de la gravedad (*De motionibus naturalibus a gravitate pendentibus*). La química no le fue ajena. La observación experimental, tampoco: tenía su propio laboratorio de disección, de cuyos ensayos con Malpighi se habla suficientemente en el libro de reseña. Alma de la Academia del Cimento, donde experimenta con los peces desprovistos de vejiga natatoria. El microscopio fue, en sus manos, una herramienta bien aprovechada, como el termómetro, unido todo ello a una absoluta independencia de criterio y una voluntad decidida de someter los procesos orgánicos a cuantificación: "la magnitud de la fuerza vital de los músculos debe medirse".

De motu animalium constituye su obra capital. Consta de dos partes, la primera, publicada en 1680, se ocupa de los movimientos externos; la segunda, 1681, aborda los movimientos internos. Cada parte se divide en numerosos capítulos, subdivididos, a su vez, en proposiciones, siendo éstas de numeración consecutiva. Su método es inductivo en la descripción; arranca, pues, de las observaciones. Considera, en cada órgano, su estructura, sus elementos componentes y su ejercicio. En los "lemas mecánicos" se vuelve, empero, deductivo. Acompaña a éstos de dibujos preciosos, que habrían de llamar la atención de Johann Bernoulli, autor de una puesta al día de dicha obra en 1743.

Borelli explica los distintos tipos de movimiento de los animales y el medio en que aquél se desarrolla: la marcha (de bípedos y cuadrúpedos), el salto, el vuelo y la natación. El estudio de la resistencia que opone el medio físico le sirve para introducir interesantes observaciones sobre densidad, corrientes, iluminación, etcétera, que sin duda sorprenderán a más de un ecólogo. Y si del movimiento externo pasamos al interno, el lector encontrará ingeniosas explicaciones sobre la circulación, intercambio gaseoso, fermentación y disolución, amén de las esperadas sobre los procesos de nutrición, función motora, sensibilidad y otras de obligado tratamiento. El principio guía subyacente es el de la economía de la naturaleza, que, si bien coincide a menudo con la vía más sencilla, no rehúye la ocasional complejidad aparente.

El movimiento y la sensación, notas distintivas del animal, están reguladas por los nervios, a través de un exudado medular: el jugo nervioso. A ellos les dedica reiterada atención a lo largo de la obra, recapitulando su doctrina en el capítulo 11 de la segunda parte. La circulación de ese jugo nervioso es el objeto de la obra de Alvaro Martínez, *Neurociencias y revolución científica en España. La circulación neural*, que acaba de publicar el CSIC.

Martínez esquematiza su obra en un prólogo, una primera parte dedicada a la doctrina de la circulación neural, en la que expone el pensamiento de Borelli, una segunda parte ("La circulación neural en la obra de un *novator* español: Martín Martínez (1684-1734)"), dos apéndices, fuentes e índice onomástico. El prólogo es de Francesc Bujosa. La primera parte constituye un buen resumen del capítulo 11 mencionado, interpretado por E. Clarke. La segunda parte, tras repetir lo escrito, años atrás, por J. M. López Piñero sobre el movimiento *novator*, elabora una puesta al día del pensamiento de Martín Martínez en lo concerniente a la anatomía y fisiología de la circulación del "líquido nérveo".

Podría alguien haber esperado más de este proyecto editorial publicado por el CSIC, tachonado de erratas según es hábito de unos años acá. En primer lugar, al crítico le hubiera gustado ver a Borelli en su pleno contexto, aunque sólo fuera el de *De motu*. Por ejemplo, el sentido pleno de la circulación nos lo da el napolitano en

el capítulo 12 de la segunda parte, es decir, el siguiente al único estudiado por A. Martínez; la función nutritiva, un poco después, en el 16; la constitución de los nervios, en el 18.

En segundo lugar, la traducción del texto de Borelli, bien realizada en general, queda a veces afeada por deficiencias de índole diversa: omisiones (p. ej. páginas 153, 155, 159, 165), incorrecciones (p. 159, quizá la más sorprendente), falta de precisión (p. 159) o de constancia (p. 165). En el caso de términos que entrañan alguna dificultad o especial sentido histórico ("imperium", "temperies") lo acertado hubiera sido añadir algunas notas a pie de página. Sobran latiguillos de leyenda negra que nunca se prueban o se apoyan en argumentos irrisorios. Esas motas obscuras suelen prevenirse en otras latitudes con una profunda labor de revisión, sobre todo si quien avala la obra es un organismo oficial. La seriedad debe llegar hasta justificar por qué no se toma de punto de referencia la primera edición de la obra de Borelli, sino la de 1743. Pero seríamos injustos si no reconociéramos el esfuerzo de síntesis en torno a la figura de Martín Martínez (L. A.).

Historia de la biología. Teorías, métodos, instituciones y biografías. Dirigida por Ilse Jahn, Rolf Löther y Konrad Senglaub. Editorial Labor; Barcelona, 1990.

Consta el volumen de 780 páginas. Intervienen varios autores más, amén de los directores. Se presenta con la "revisión y adiciones al texto castellano" de Luis García Ballester. La traducción, de la segunda edición alemana, es de José Luis Gil.

No sé si el lector conoce las relaciones entre la física nuclear y el materialismo dialéctico; yo, no. O la trabazón entre biología y marxismo. Me refiero, por supuesto, a los contenidos propios, no al uso, extrapolación o metáforas que puedan idearse. Cuando se confunde el sebo con la velocidad, aunque el tocino sea bueno para darle agilidad a los ejes de las carretas –y de ahí la expresión castiza–, resulta un híbrido que ni es filosofía materialista, ni es biología, ni es sociología de la ciencia. Se convierte en producto "ideologisiert", que, tras la perestroika y la caída del muro de Berlín, no debe servir ya ni para sus destinatorios: los alumnos de las universidades de Alemania Oriental. Se trata de un manual donde el *diktat* no se limita a las páginas adoctrinadoras de Rolf Löther, mentor conspicuo del socialismo real, sino que degrada, como mancha de aceite, no pocas páginas aprovechables.

Aunque Lenin aparezca más veces que Lavoisier (en el índice onomástico falta la referencia de la página 524 del líder comunista), Marx más que Mattioli, Medawar y Volterra juntos, y Engels más que Watson y Crick, le sugiero al lector que repita mi propia experiencia: en una segunda vuelta, tape con papel las páginas "de formación del buen marxista" y se concentre en las explicaciones de las teorías, los métodos, las instituciones y biografía breves, que de eso debiera tratarse a tenor del subtítulo. Hallará, como novedad, una exposición detenida de la biología en los países allende el telón de acero; en particular en la República Democrática Alemana y en Rusia. Sea benevolente y acepte la interpretación sesgada de Lysenko o Mitschurin.

Tampoco se sobresalte con la periodización de la curva histórica de la biología. Así reza el índice: conocimientos y nociones acerca de los seres vivos, desde la sociedad primitiva hasta el desarrollo pleno del feudalismo (8000 a. de C.–siglo XIV); la evolución de la ciencia de la biología en el capitalismo temprano hasta la revolución industrial (siglos XV-XVIII); la formación de las disciplinas biológicas especiales en la época del capitalismo temprano hasta la revolución industrial (siglos XV-XVIII); la formación de las disciplinas biológicas especiales en la época del capitalismo de libre competencia; tendencias de la biología en el siglo XX, y biografías breves y bibliografía de fuentes. La introducción previa, sobre el planteamiento marxista de la historia de la biología, pone de manifiesto cuáles van a ser los criterios de interpretación: "El mundo del desarrollo del progreso científico aquí expuesto es el resultado de una numerosa serie de análisis históricos, empleando la *metodología del materialismo histórico y dialéctico* que Marx y Engels elaboraron como sistema metodológico para el análisis de procesos evolutivos en la naturaleza y en la sociedad" (p. 28). Declaración de principios que explica el empeño del propio Marx (y la reticente oposición del mismo Darwin) por confundir evolución con materialismo histórico, y que los pupilos del primero desarrollan aquí con una extensión, cuando menos, desproporcionada en relación con el trato que reciben otros capítulos del quehacer biológico. Más aún. La evolución se detiene en la teoría sintética, sin hacerse siquiera apagado eco de los nuevos enfoques de Gould, Lowtrup o los rebrotes lamarckistas.

En ese envejecimiento reside, en mi opinión, la principal deficiencia del libro, una vez entendido que no deben mezclarse los planos, el biológico y el filosófico (sea marxista, analítico, neokantiano o de la piara de Epicuro). Capítulos enteros de la biología, los nacidos de la técnica de ADN recombinante en particular, se desconocen; la bioquímica no llega a la cuestión del transporte de iones a través de membrana (Mitchel, como emblema, no aparece); la genética del desarrollo y la citología que se funda en un mejor dominio de los microtúbulos, el huso y la cromatina, ni asoman. Pasemos a la sistemática; o no pasemos, porque no encontraremos la herramienta básica de microbiólogos, botánicos y zoólogos: la taxonomía numérica. ¿Se puede hablar de organismos unicelulares sin recordar, como punto de partida, de desarrollo y de apertura de nuevas vías, la figura de T. M. Sonnebron? No se afane el ecólogo por encontrar la influencia de Maynard Smith, ni el virólogo por hallar el resumen de su disciplina: ni siquiera se mencionan los viroides. El paleontólogo permanece en la paleontología de su ciencia. Suprimiendo páginas de fárrago doctrinario, esos fallos quizá no se hubieran producido.

Si mucho nos apuran habrá que reconocer el sabor a rancio de lo que podríamos considerar capítulos clásicos. La biología aristotélica ha asistido en los últimos años, desde distintos flancos, a un replanteamiento general que afecta a la composición de los tratados naturalistas, su análisis interno y el alcance sistemático de los grupos implicados. Dioscórides admite ya una interpretación quimiofarmacéutica en la descripción ordenada de las plantas. Mucho se ha avanzado en la biología medieval para que se nos siga resumiendo a Meyer o Balss. La preeminencia que se concede a Centroeuropa en todo el libro tiene su ejemplo, en el Renacimiento, en la omisión de figuras capitales francesas (Ruel), italianas (Leoniceno o Ghini) o inglesas (Turner). Y cuando se citan con cierto pormenor, el caso de Cesalpino, la explicación de su sistema es inexacta, si damos por buenos los análisis de Bremekamp y Moggi. No seguiremos. Ni ocuparemos el breve espacio que nos queda en disonancias menores, como la falta de coherencia en la denominación: ¿por qué Hieronymus Bock y Rembert Dodonaeus? Puestos a latinizar, todo el mundo llamaba a aquél Hieronymus Tragus.

Es de justicia aplaudir la labor traductora de Gil. Menos entusiasta es el

juicio que nos merece el trabajo de García Ballester. El tiempo le jugó una mala pasada en el prólogo, con la reedición contemporánea de la *Historia de las teorías biológicas*, de E. M. Radl. (En ese punto, se quedó, él también, añejo.) Dejaré de lado el texto del prólogo y las revisiones. Y me ceñiré a las adiciones, es decir, a una posible historia de la biología española en billetes. Es obvio que el *Manual* no es suyo, de García Ballester, y ha de acomodarse a la distribución de partes y temas realizada por los autores. Parco espacio le queda. Y opta por aprovecharlo en una suerte de remoquetes o "morcillas" en expresión teatral, y, como tales, proclives al efectismo (caso de Hernández). Es un camino. Al crítico le hubiera gustado más pasar a notas extensas, a pie de página, la aportación española encuadrada en escuelas, grupos o corrientes.

García Ballester centra su mayor esfuerzo en el apartado dedicado a las biografías breves. Confiesa su deuda del *Diccionario histórico de la ciencia moderna en España*, de López Piñero et alii. Y así, autores que no recogen ese magnífico compendio, faltan aquí: Almera y Cipriano Costa, por ejemplo. Se entretiene en otros, caso de Comas Solà, para los que necesitamos un microscopio electrónico si queremos descubrir un adarme de biologismo en su obra (espiritismos aparte). Esas lagunas se colmatarían si, volviendo a lo de notas extensas, García Ballester hubiera abordado la introducción del sistema natural en España y su prolongación en la escuela catalana (Costa, Teixidor, Plans, Bassagaña, etcétera) o lo pertinente en paleontología con Almera y su escuela hasta Crusafont, o Vilanova y Hernández Pacheco.

Nombres que al adaptador no le parezcan de suficiente peso, encuentran sin embargo cabida en el flujo de una línea o una corriente. (Micó o Yáñez en distintas auroras botánicas, Rus o Risueño en diversos empeños zoológicos.) Propio del adaptador parece ser también incluir la influencia decisiva de los foráneos en los españoles. Yo apuntaría a Sachs, por citar un ejemplo indiscutible. Pero no en la edición alemana de las obras que trae este manual, sino en la francesa. La fisiología vegetal llegó a España a través de su *Physiologie végétale* (París, 1868); y también en francés su historia de la botánica. No es fácil la tarea de adaptador de un manual de historia de la biología, por la magra tradición de su cultivo en nuestro país, pero no será el crítico quien acepte lo único por bueno. (L. A.)

El espíritu en el átomo, por P. C. W. Davies y J. R. Brown. Alianza Editorial; Madrid, 1989.

Este libro plantea en una primera parte y de una forma demasiado resumida para que las sutilezas sean bien entendidas dos cuestiones importantes en mecánica cuántica. La primera de ellas es la interferencia de fotones u otras partículas cuando recorren caminos diferentes; la segunda es la célebre paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen sobre las medidas en dos sistemas separados y correlacionados. Esto les sirve a los autores para introducir los dilemas de la onda-partícula y del instrumento de medida (macroscópico y clásico) que mide algo microscópico y, por tanto, cuántico. Una vez hecho un resumen muy somero sobre las posibles interpretaciones actuales de estos problemas, los autores pasan, en la segunda parte del libro, a reproducir entrevistas radiofónicas que hicieron a diversas personalidades científicas para que opinaran sobre estos problemas y otros relacionados.

Sin embargo, lo primero que se me ocurre después de la lectura de este pequeño libro, exagerando un poco para que se capte mejor la idea, es que si la comunidad de físicos tuviera un índice de libros prohibidos para lectores poco formados, éste sería un candidato seguro. Veamos cuáles son las razones.

Para la mayoría de los físicos que hacen investigación contrastable y refutable tanto experimental como teóricamente, la frase de David Bohm según la cual "la mecánica cuántica puede describir únicamente lo que puede observarse en un aparato de medida" (pág. 160), les parecerá totalmente satisfactoria y en completo acuerdo con el modo de proceder en su trabajo. Esta posición pragmática es la que guía sus investigaciones y, sobre todo, guía la exposición de sus resultados ante la comunidad científica.

La frase anterior está bien escogida por su autor, pues con la palabra "únicamente" quiere indicar que existen aspectos capitales no susceptibles de observación, como pueden ser las teorías subyacentes, que, en la mayoría de los casos, son más estimulantes que los meros datos observacionales. Las entrevistas hacen referencia precisamente a diferentes teorías o interpretaciones alternativas a las actuales en mecánica cuántica.

Por otra parte, los científicos se reservan un poco de su imaginación para lanzarse a especulaciones fantásticas y solitarias con el deseo de captar alguna idea que, aunque inicialmente disparatada, se transforme al final en algo brillante que proporcione fama y honores. Esta actividad se suele mantener muy oculta y sólo se muestra en contadas ocasiones y delante de colegas de toda confianza y en momentos de particular euforia.

El mérito de los autores de este libro es haber conseguido la confianza de los profesores entrevistados para que hablaran con toda libertad sobre este tipo de cosas. De tal forma que, en algunos casos, no sabríamos distinguir si estamos ante una discusión científica o en un programa divulgativo de "ciencias ocultas". Claro que el título del libro *El espíritu*... (en realidad, «El fantasma...» en una traducción más literal y ajustada) ya parece insinuar por dónde van a ir las entrevistas. Así, podemos enterarnos de cuestiones pintorescas y en algunos casos ingeniosas sobre la existencia de infinitos universos paralelos al nuestro y su posible comprobación mental, la influencia de la mente (humana, animal o de Dios) o la de un observador inanimado (robot) sobre los experimentos, la naturaleza cuántica de la mente, la violación de la causalidad y retroceso al pasado, etcétera. Temas que podemos encontrar tratados también, aunque de otra forma, en cualquier panfleto sobre parasicología y demás pseudociencias.

Las personas con cierta preparación seria en mecánica cuántica encontrarán todo esto divertido, superficial o quizás interesante, pero no le darán mayor transcendencia. En cambio, una persona sin demasiada preparación creerá encontrar fundamentos científicos para cualquier teoría pseudocientífica. Y entonces no nos sorprendamos cuando oigamos que el doblamiento de cucharas es otro más de los maravillosos fenómenos a que nos tiene acostumbrados la mecánica cuántica en vez de un mero fenómeno ilusionista. Y para el que crea que esto es una broma le recomiendo que lea antes el libro de Martin Gadner *La ciencia, lo malo y lo falso*. Además podrán enterarse de paso de lo que opina Gadner sobre el profesor John Taylor, que es precisamente uno de los entrevistados.

Mi último comentario se dirige a aquellas personas aficionadas a los temas científicos. Piensen que la mecánica cuántica, como herramienta de trabajo, está más consolidada que la mecánica de Newton, y que antes de introducir una nueva "mejora" ingeniosa hay que mirar no sólo si ganamos algo novedoso, sino también lo que perdemos y que ya estaba bien comprendido. (J. M. S.)

Apuntes

Los cambios anatómicos sufridos por hojas y acículas de los árboles sometidos a la agresión directa de los gases contaminantes ha sido objeto de intensa investigación durante los últimos años, en un empeño por descubrir las distintas respuestas ante cada tipo de contaminante y establecer criterios anatómicos para el diagnóstico del daño infligido. Más olvidado, empero, ha estado el estudio de los efectos indirectos de esos gases y de la lluvia ácida sobre las hojas y las acículas de los árboles a través de la acidificación de los suelos y el menoscabo de nutrientes. Comienza ya a saberse que este mecanismo indirecto reviste más importancia en la pérdida de masa forestal europea que la agresión directa.

De acuerdo con la teoría vigente sobre la evolución estelar, se admite que las estrellas de brazos horizontales poseen un núcleo denso y una extensa envoltura. En el estrecho hiato entre uno y otra se quema el hidrógeno, en tanto que la combustión del helio en el centro del núcleo se ofrece como una segunda fuente de energía. Agotado el helio, la estrella adquiriría una forma de doble capa y aumentaría su brillo. En ese proceso, ligado a la convección del núcleo, intervendrían los cosmiones, partículas de interacción débil a las que se atribuye la materia obscura de las galaxias. Cálculos numéricos recientes prueban que las tasas de acreción de los cosmiones deben variar en la localización estelar: las estrellas de los cúmulos del interior galáctico recaban más cosmiones que las de la periferia.

Los púlsares son estrellas de neutrones en rotación que se distinguen por la exquisita estabilidad de su período rítmico fundamental, hasta el punto de que se ha pensado en ellos como sistema de referencia para medir el tiempo terrestre. Pero esa regularidad es propia de las estrellas maduras; los púlsares jóvenes la rompen a veces en súbitas aceleraciones de la frecuencia de rotación. La causa, se ve ahora, yace en la inmovilización y liberación de los núcleos fluidos de los vórtices.

La aplicación de la microscopía a la química está rindiendo buenos frutos. La velocidad de las reacciones químicas muestra oscilaciones temporales, aunque se mantengan constantes los parámetros de la reacción. Oscilaciones que tal vez van asociadas a la formación de pautas espaciales instadas por las variaciones locales de concentración, de temperatura o de ambas. En el caso de la oxidación catalítica del monóxido de carbono en la superficie de monocristales de platino, el microscopio electrónico de fotoemisión registra, en serie de instantáneas de finísima resolución, ese comportamiento pautado.

Los movimientos foliares de las plantas siguen a menudo ritmos circadianos, cuya sencillez ha servido de modelo para el estudio de los biorritmos. En *Phaseolus vulgaris* ese movimiento se traduce en retracción nocturna y estiramiento diurno gracias a la deformación de un órgano situado en el punto de unión del limbo con el peciolo. El movimiento corresponde al aumento y disminución periódica de la talla longitudinal de las células del parénquima. El proceso depende, en última instancia, de la migración de los iones potasio en dicho órgano.

Es evidente que la hipótesis de W. Alvarez, según la cual el Cretácico terminó cataclísmicamente por impacto de un cometa o un asteroide, está dando mucho juego. Ante las tímidas oposiciones, abundan las confirmaciones. La última es el análisis de la radiación térmica producida por la caída de objetos condensados procedentes de la pluma de vapor del impacto; radiación que multiplicaría entre 50 y 150 veces el flujo radiativo global y que sería responsable de aquella tierra en llamas que acabó con buena parte de las especies animales. La penúltima prueba es de orden paleobotánico y se refiere al intervalo subsiguiente a la frontera entre el Cretácico y el Terciario: durante más de medio millón de años hubo plantas adaptadas a temperaturas superiores, en diez grados, a las consideradas normales.

La genética aplicada avanza con firmeza. Tras el descubrimiento de los defectos hereditarios que causan la distrofia muscular de Duchenne y la fibrosis quística, se ha identificado el cambio del mensaje molecular que provoca una forma de degeneración retiniana con resultado de ceguera. Cierta mutación puntual del gen que determina la proteína rodopsina provoca una clase de retinitis pigmentosa. La alteración consiste en la reversión de la citosina en adenina, cambio que induce la aparición del aminoácido histidina donde había antes una prolina. Quedan, empero, muchos cabos sueltos; por ejemplo: si la mutación se produce en un gen exclusivo de los bastoncillos, ¿por qué provoca la degeneración de los conos también?